



# La sédimentation organique associée à deux systèmes d'upwelling en Amérique du Sud tropicale : implications paléocéanographiques et paléoclimatiques au cours de l'Holocène

Marcio Gurgel

## ► To cite this version:

Marcio Gurgel. La sédimentation organique associée à deux systèmes d'upwelling en Amérique du Sud tropicale : implications paléocéanographiques et paléoclimatiques au cours de l'Holocène. Géochimie. Université d'Orléans, 2008. Français. NNT : . tel-00334019

**HAL Id: tel-00334019**

**<https://theses.hal.science/tel-00334019>**

Submitted on 24 Oct 2008

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES ET TECHNOLOGIES**

**LABORATOIRES :**

**INSTITUT DES SCIENCES DE LA TERRE D'ORLÉANS /  
PALÉOENVIRONNEMENTS TROPICAUX ET VARIABILITÉ CLIMATIQUE**

## THÈSE présentée par :

**Marcio Henrique DA COSTA GURGEL**

soutenue le : **17 juillet 2008**

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'Université d'Orléans**

Discipline : Environnements et paléoenvironnements océaniques

**La sédimentation organique associée à deux  
systèmes d'upwelling en Amérique du Sud  
tropicale : implications paléocéanographiques  
et paléoclimatiques au cours de l'Holocène**

**THÈSE dirigée par :**

**Mme Élisabeth LALLIER-VERGÈS** Directeur de Recherche, CNRS

**M Abdelfettah SIFEDDINE** Directeur de Recherche, IRD

**RAPPORTEURS :**

**M Philippe BERTRAND**

Directeur de Recherche, CNRS

**M Luc BEAUFORT**

Directeur de Recherche, CNRS

---

**JURY :**

**M Christian DI-GIOVANNI**

Professeur des universités, Université d'Orléans

**M Bastiaan A. KNOPPERS**

Professor associado, Universidade Federal Fluminense (Brésil)

**M Dimitri GUTIÉRREZ**

Investigador científico, Instituto del Mar del Perú (Pérou)

**M Mohammed BOUSSAFIR**

Maitre de conférences, Université d'Orléans (Co-encadrant)

**M Philippe BERTRAND**

Directeur de Recherche, CNRS

**M Luc BEAUFORT**

Directeur de Recherche, CNRS

**Mme Élisabeth LALLIER-VERGÈS** Directeur de Recherche, CNRS

**M Abdelfettah SIFEDDINE** Directeur de Recherche, IRD



*Meu pai sempre me dizia:  
Meu filho tome cuidado,  
Quando eu penso no futuro,  
Não esqueço o meu passado!...*

*“Mon père me disait toujours:  
Mons fils soit prudent,  
Quand je pense au futur,  
Je n’oublis pas mon passé !... »*

***Paulinho da viola  
Dança da solidão  
1972***





À Anik, qui en plus d'être suffisamment folle pour m'avoir accepté comme mari, a su me partager très inégalement avec cette thèse pendant cette première année de mariage ;

À mon père, que ma toujours poussé... n'importe où j'allais, même « *pro brejo* » si mon nez y pointait ... ;

À ma sœur, avec qui on s'est partagé la Terre : la partie sous l'air à elle, la partie sous l'eau à moi... ;

À mon frère, qui « *nunca sabe de nada* »... ;

À ma mère, qui doit être en train de rigoler de tout ça... ; et



# Remerciements

La réalisation de cette thèse n'aurait pas été possible sans le financement octroyé par le gouvernement brésilien via la *Coordenação de Pessoal de Nível Superior do Ministério da Educação* (CAPES / MEC), sous la forme d'une allocation de recherche (BEX 1727-02/8). Je remercie profondément cette agence ainsi que tout le personnel qui a œuvré pour la bonne gestion administrative de cette allocation. En France, les moyens qui m'ont été alloués par l'Institut de recherche pour le développement (IRD) et par le Centre national de la recherche scientifique (CNRS) ont contribué à la bonne marche de mes activités de recherche. Que ces institutions reçoivent ici toute mon estime et ma gratitude. Ce travail serait incomplet sans le concours de l'*Instituto del Mar del Perú*, organisme du gouvernement péruvien qui a autorisé le prélèvement de carottes sur les côtes péruviennes et leur étude, *muchas gracias*. Enfin, à l'Université d'Orléans qui m'a accueilli tout au long de cette thèse, je remercie tout le personnel technico-administratif et particulièrement Mme Teixeira de la Sclolarité de la faculté des sciences, Mme Bizière de l'École doctorale sciences et technologies et Mme Bargain du service des thèses.

On ne vient pas à bout d'une thèse sans avoir un projet et une direction scientifique. Je suis donc profondément reconnaissant envers M Abdelfettah SIFEDDINE, qui ma « entraîné » en France et me « ramène » au Brésil. C'est aussi avec énorme gratitude que je remercie Mme Élisabeth LALLIER-VERGÈS d'avoir assumé une partie de la direction et de m'avoir ouvert les portes des géosciences orléanaises. L'encadrement, non seulement « moléculaire » de M Mohammed BOUSSAFIR fut essentiel dans tous aspects de la thèse. Tous m'ont procuré plus que la direction dans les chemins de la science, et j'étends mes remerciements les plus sincères à leurs familles, avec qui j'ai partagé d'agréables moments et à qui j'ai volé un peu de temps en famille de leurs conjoints/parents, surtout à la fin de la rédaction. Je pense à Karima, Ali, Afaf, Kenza, Yasmina, Wissan, Yassine, Samia, Julie, Benjamin et Clémentine.

M Philippe BERTRAND et M Luc BEAUFORT sont priés de recevoir mes plus vifs remerciements pour avoir accepté la tâche de rapporteur, dont les critiques et suggestions sont vivement appréciées. Que les autres membres du jury, Messieurs Christian DI-GIOVANNI, Dimitri GUTIERREZ et Bastiaan KNOPPERS soient remerciés pour leur évaluation de ce travail de recherche. Merci encore à Christian de nous distraire avec ses exploits sportifs, à Dimitri de m'avoir donné la chance d'étudier la côte péruvienne et à Bastiaan pour l'accompagnement de mes travaux depuis le Master au *Programa de Geoquímica* (2000).

L'accueil qui m'a été réservé au sein des laboratoires auxquels j'étais rattaché pendant cette courte (très courte période !) de ma vie, l'ISTO et le PALEOTROPIQUE, ne quittera pas de si tôt mon esprit. Je me rappellerai pendant longtemps de ces moments car ce furent des moments de

cohabitation très agréables même si parfois émaillés de coups de gueule. Vous êtes trop nombreux pour que je puisse tous vous nommer mais je vous embrasse tous « latinement » et sachez que je vous garderai tous dans un coin de mon cerveau et de mon cœur. Que messieurs Ary BRUAND et Luc ORTLIEB les directeurs de ces deux laboratoires soient porteurs de mes remerciés.

Aux personnes ayant participé aux activités associées à cette thèse, mon plus grand merci : sans vous rien n'aurait été possible. Je pense particulièrement à : Marielle Hatton, Aude Durand, Didier Keravis, Nathalie Lottier, Nathalie Pothier, Chantal Le Coq, Fabienne Le Bihan, Marie-Noëlle Pailhès, Laurent Catherine, Antoine Mattei, Catherine LeRoy, Nathalie Teinturier, Hugues Bouches, Magloire Mandeng Yogo, Fethyé Cetin, Sandrine Caquineau, Danièle Capdupuy, Thierry Pillorge, Ingrid Caffy, Joel Saint Paul, Michel Cremer, ...

Aux compagnons de route (ou de dérouté !), les anciens : Yoann Copard, Jeremy Jacob, Cyril Marchand, Andrew Mort, Pierre Nzoussi, Hervé Noël, Nury Guzman, Laëtitia Pichevin, Raphaël Blanke, ... ; les contemporains : Sylvain Drouin (Geraldine et Noé), Aida Ben Hassen, Jerome Gouin, Natahalie et Yoann Tuduri-Volland, Sébatien Jego, Mathieu Gautier, Aurore Joly, Pierre Trap, Laure Commont, Erik Gloaguen, Eugene Be, Priscille Lesne, Julien Charreau, Manuel Duguet, Wang Bo, Sebastien Gogo, François Orange, Julie Tranier, Berengère Laslandes, Veronique Houdelot, Michele Morata de Andrade, Alice Candido Cruz da Silva Oliveira, ...; les futurs docteurs, Audrey Gallaud, Gerardo Soto, Amanda Cristina Pires, Aurore Dissaux, Adriana (et Marcelo) Reatto Braga, Khalifa El-Dursi, Yann Graz, Mourad Essalhi, Jérémie Meleton, Mouna El Mekki, David Picard, Séverine Anne, Nicolas Charles, Frédéric Delarue, Edith Mollard, Pierrick Defossez, Yolaine Rubert, Boris Sterligov, Paul Tourrilot, Renata Zocatelli, Wilfried Gourdon, Marc Gosselin, ...

Aux amis prêtés par ma sœur : Tchansia « *Maria* » Koné, Gervais Wafo, Yann Reinette, Sébastien Kiéma, Kenji Osé, Maureen Douka, Christophe Mahuzier, Fabian Reyes, Pablo Alvarez, Damien Davy, Nasser Baco..., la famille Nédelec, Marcia et Ricardo Caffé, Marcos et Meriane Monteiro Diniz-Neves Linhares, Marcos et Suzane Freitas, et tant d'autres...

À la famille Carlué-Grandemange-Da Costa-Gurgel : Annie, Gilles, Marilene, Alcides, Helen, Loïc, Fanny, Rafael, les ascendants, les descendants, les tantes, les oncles, les cousines, les cousins, merci pour le soutien .... Anik, je ne connais pas de mot capable d'exprimer... je ne peux couper le diplôme en deux, mais au moins la moitié, est à toi. « Doc » pour moi et « teur » pour toi, ça marche !?

Plein d'autres personnes ont contribué à mon arrivé jusqu'à ces lignes : Raquel Pinhão da Silveira, Izabel Gurgel, Friedrich Herms, Renato Carreira, Angela Wagner, Ana Luiza Albuquerque, Jorge Abrão, tous ceux ayant fait / faisant partie du Departamento de Oceanografia de l'Universidade do Estado do Rio de Janeiro, du Programa de Geoquímica Ambiental de l'Universidade Federal Fluminense et de l'Instituto de Química de la Pontificia Universidade Catolica do Rio de Janeiro.

A tous ceux, qui font de ces pages un endroit trop petit et la mémoire trop courte (et pas fiable) !!!

*Muito obrigado*

# Table des matières

<b>REMERCIEMENTS</b>	<b>7</b>
<b>RESUME</b>	<b>13</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>15</b>
<b>I – AVANT-PROPOS</b>	<b>17</b>
I.1. OBJECTIFS DE L’ETUDE	17
I.2. STRUCTURATION DE LA THESE	19
<b>II – INTRODUCTION</b>	<b>23</b>
II.1. LE CLIMAT ET L’OCEAN	23
II.2. PALEOCLIMATOLOGIE DE LA REGION TROPICALE	30
II.3. LES ZONES D’UPWELLING : LA DYNAMIQUE DES GRANDS PRODUCTEURS DE MATIERE ORGANIQUE	35
II.4. LA MATIERE ORGANIQUE SEDIMENTAIRE	39
II.4.1. UN OUTIL PORTEUR DE PALEO-INFORMATIONS	39
II.4.2. LA MATIERE ORGANIQUE DANS LE CONTEXTE OCEANIQUE : DE LA PRODUCTION DANS LA COLONNE D’EAU AUX CHANGEMENTS POST-ENSEVELISSEMENT	40

<b>III – METHODOLOGIE</b>	<b>45</b>
<b>III.1. LITHOLOGIE</b>	<b>46</b>
III.1.1. L'IMAGERIE RADIOGRAPHIQUE	46
III.1.2. TENEUR EN EAU ET DENSITE	48
<b>III.2. CONTROLE CHRONOLOGIQUE</b>	<b>49</b>
III.2.1. DATATIONS	49
III.2.2. MODELE CHRONOLOGIQUE	51
<b>III.3. CARACTERISATION DE LA FRACTION ORGANIQUE</b>	<b>52</b>
III.3.1 LES OBSERVATIONS PETROGRAPHIQUES	52
III.3.2 ANALYSES GEOCHIMIQUES ELEMENTAIRES	54
III.3.3. ANALYSES GEOCHIMIQUES PAR PYROLYSE ROCK-EVAL 6®	56
III.3.4. ANALYSES GEOCHIMIQUES MOLECULAIRES	61
III.3.4.1. Les n-alcanes	62
III.3.4.2. Les alcénones, indicateur paléothermométrique	67
III.3.4.3. Extraction et séparation de la fraction lipidique libre	70
III.3.4.4. Les analyses chromatographiques	72
<b>IV – SITE ATLANTIQUE SUD-OUEST</b>	<b>77</b>
<b>IV.1. CARACTERISATION ENVIRONNEMENTALE</b>	<b>77</b>
IV.1.1 CONTEXTE GENERAL	77
IV.1.2. CIRCULATION OCEANIQUE DE LA REGION	80
IV.1.3. ORIGINE ET CARACTERISTIQUES DES EAUX MARINES	82
IV.1.3.1. La productivité primaire régionale	84
IV.1.4. SYSTEME CLIMATIQUE REGIONAL	86
IV.1.4.1. Les variabilités climatiques de l'Atlantique sud	90
IV.1.5. APPORT FLUVIAL A L'OCEAN	95
IV.1.6. SEDIMENTOLOGIE	97
<b>IV.2. RESULTATS</b>	<b>100</b>
IV.2.1 PRELEVEMENT DE LA COLONNE SEDIMENTAIRE	101
IV.2.2 CARACTERISTIQUES LITHOLOGIQUES	102
IV.2.2.1. Analyses radioscopiques	102
IV.2.2.2. Chronologie et taux de sédimentation	105
IV.2.3 ANALYSES ELEMENTAIRES	110
IV.2.4. PYROLYSE ROCK-EVAL	114
IV.2.5 PETROGRAPHIE DE LA MATIERE ORGANIQUE SEDIMENTAIRE	118
IV.2.6. DISTRIBUTION DES MARQUEURS MOLECULAIRES	124
IV.2.6.1. Les n-alcanes	124
IV.2.6.2. Les alcénones	132
<b>IV.3. DISCUSSION</b>	<b>136</b>
<b>IV.4. CONCLUSIONS PARTIELLES</b>	<b>147</b>

<b><u>V – SITE PACIFIQUE SUD-EST.</u></b>	<b>151</b>
<b>V.1. CADRE ENVIRONNEMENTAL</b>	<b>152</b>
V.1.1. CONTEXTE GENERAL	152
V.1.2 CIRCULATION OCEANIQUE DE LA REGION	155
V.1.3. ORIGINE ET CARACTERISTIQUES DES EAUX MARINES	158
V.1.3.1 Les masses d'eau	158
IV.1.3.2 La productivité primaire régionale et la zone de minimum d'oxygène	161
V.1.4. LE SYSTEME CLIMATIQUE REGIONAL	163
V.1.4.1 Contexte climatique général	163
V.1.4.2. Les variabilités climatiques du Pacifique	167
V.1.5 APPORT FLUVIAL A L'OCEAN	173
V.1.6 SEDIMENTOLOGIE	175
<b>V.2. RESULTATS</b>	<b>177</b>
V.2.1. PRELEVEMENT	177
V.2.2. CARACTERISTIQUES LITHOLOGIQUES	178
V.2.2.1. Analyses SCOPIX	178
V.2.2.2. Chronologie et taux de sédimentation	182
V.2.3. ANALYSES ELEMENTAIRES	186
V.2.4. PYROLYSE ROCK-EVAL	189
V.2.5. PETROGRAPHIE DE LA MATIERE ORGANIQUE SEDIMENTAIRE	193
V.2.6. DISTRIBUTION DES MARQUEURS MOLECULAIRES	199
V.2.6.1. Les n-alcanes	199
IV.2.6.2. Les alcénones	208
<b>V.3. DISCUSSION</b>	<b>212</b>
<b>V.4. CONCLUSIONS PARTIELLES</b>	<b>220</b>
 <b><u>VI – IMPLICATIONS PALEOCEANOGRAPHIQUES ET PALEOCLIMATIQUES</u></b>	 <b>223</b>
 <b><u>VII – CONCLUSION GENERALE</u></b>	 <b>239</b>
 <b><u>VIII - LISTE DE FIGURES</u></b>	 <b>263</b>
 <b><u>IX. – ANNEXES</u></b>	 <b>271</b>



<b>IX.1. – EFFETS RESERVOIR FIGURANT SUR LA BASE DE DONNEES EN</b>	
<b>LIGNE : « <a href="http://calib.qub.ac.uk/marine">HTTP://CALIB.QUB.AC.UK/MARINE</a> »</b>	<b>272</b>
IX.1.1. – SITE ATLANTIQUE SUD-OUEST	272
IX.1.2. – SITE PACIFIQUE SUD-EST	273
<b>IX.2. – TABLEAUX DE DONNEES OBTENUS DU SITE</b>	<b>275</b>
IX.2.1. – SITE ATLANTIQUE SUD-OUEST	275
IX.2.1. – SITE PACIFIQUE SUD-EST	291
<b>IX.3. – PROFILS DE DISTRIBUTIONS DE LA TOTALITE DES CLASSES DE</b>	
<b>PALYNOFACIES OBSERVES</b>	<b>323</b>
IX.3.1. – SITE ATLANTIQUE SUD-OUEST	323
IX.3.2. – SITE PACIFIQUE SUD-EST	327

## Résumé

Le climat de l'Amérique du Sud est fortement soumis aux interactions entre l'océan et l'atmosphère, aussi bien du Pacifique que de l'Atlantique. Ce travail entre dans le projet de coopération CLIMPAST (IRD-CNPq) et s'appuie sur une collaboration entre le Brésil (CAPES, UFF), le Pérou (IMARPE) et la France (IRD, CNRS, Université d'Orléans). Cette thèse a pour objectif la reconstruction de l'évolution du climat de l'Amérique du Sud au cours de l'Holocène (12 000 - 800 ans cal BP). Elle concerne l'étude, à haute résolution temporelle, de multiples marqueurs organo-sédimentaires provenant de zones de haute productivité de la plateforme continentale de part et d'autre de l'Amérique du Sud. Deux carottes sédimentaires ont été étudiées, une prélevée dans le système d'upwelling saisonnier de Cabo Frio (Brésil) et l'autre dans le système permanent du courant de Humboldt (Pérou). La matière organique a été étudiée par analyse élémentaire, pyrolyse Rock-Eval, microscopie optique et géochimie moléculaire. Appuyées sur une stratigraphie de très haute résolution (imagerie radioscopique et modèles chronologiques  $^{14}\text{C}$ ), l'ensemble des résultats a permis de mettre en évidence des changements climatiques, de l'échelle du millénaire à celle de la décennie, liés aux déplacements de la zone de convergence intertropicale et de celle de l'Atlantique Sud. La remontée du niveau de la mer de la dernière déglaciation apparaît concomitante d'une forte humidité sur le continent Sud-Américain. A partir de l'Holocène moyen, l'expression de l'upwelling sur la côte ouest, est maximale alors que sur la côte est, on note des phénomènes érosifs dus aux courants de fond. A l'Holocène supérieur, des signaux de haute fréquence de type El Nino passent successivement au moment de l'Optimum Climatique Médiéval, à des signaux de moindre fréquence du type La Nina.



## Abstract

South American climate is strongly affected by ocean-atmosphere interactions, especially those coming from Pacific and Atlantic oceans. This work is under the scope of a broad scientific cooperation project CLIMPAST (IRD - CNPq), and is financially supported by Brazil (CAPES, UFF), Peru (IMARPE) and France (IRD, CNRS, Université d'Orléans). The objectives of this thesis are to reconstruct the climatic evolution of South America during the Holocene (12 000 - 800 ans cal BP). It is based on a high temporal resolution study of several organic sedimentary proxies from high productivity zones of eastern and western continental shelves of South America. Two sedimentary cores were studied, the first was sampled in the Cabo Frio (Brazil) seasonal upwelling system and the last was sampled from Humboldt Current in front of Peru, the latter was from a permanent upwelling system. The organic matter was analysed by bulk elementary, Rock-Eval pyrolysis, palynofacies and molecular geochemical methods, as well as a very high resolution stratigraphy (X ray imaging and  $^{14}\text{C}$  based chronological models). Based on our results we have reconstructed the climatic changes in different time scales (millennium to decadal time intervals), mainly linked to the displacements of Intertropical and South Atlantic Convergence Zones. Last sea level rising is accompanied by moiste conditions on the continent. Middle Holocene represents the strongest upwelling records in the Atlantic side. Eroded traces are found in the Pacific side during the same period. While the Upper Holocene shows higher frequency (El Niño type) and then changed to more low frequency during the Medieval Climate Optimum, guided by a La Niña type record.



# **I – Avant-propos**

## ***I.1. Objectifs de l'étude***

La communauté scientifique mondiale s'efforce d'analyser l'évolution climatique de la Terre aux échelles spatiales et temporelles les plus diverses. La mise en cohérence des études antérieures, le plus souvent isolées et locales, a donné lieu à des efforts concentrés et coordonnés pour améliorer la compréhension, la modélisation et la prévision du climat.

En revanche, jusqu'à aujourd'hui, peu d'études ont été menées dans le but d'expliquer et de déterminer les causes des divers changements climatiques opérant dans les régions tropicales mais, en l'état actuel des connaissances, il apparaît que d'une part (1) le Pacifique, grâce à sa large inertie thermique, doit avoir amplifié ou atténué les forçages orbitaux durant le début de l'Holocène ; que d'autre part, (2) les phénomènes El-Niño (ENSO) doivent, probablement, être à l'origine des sécheresses

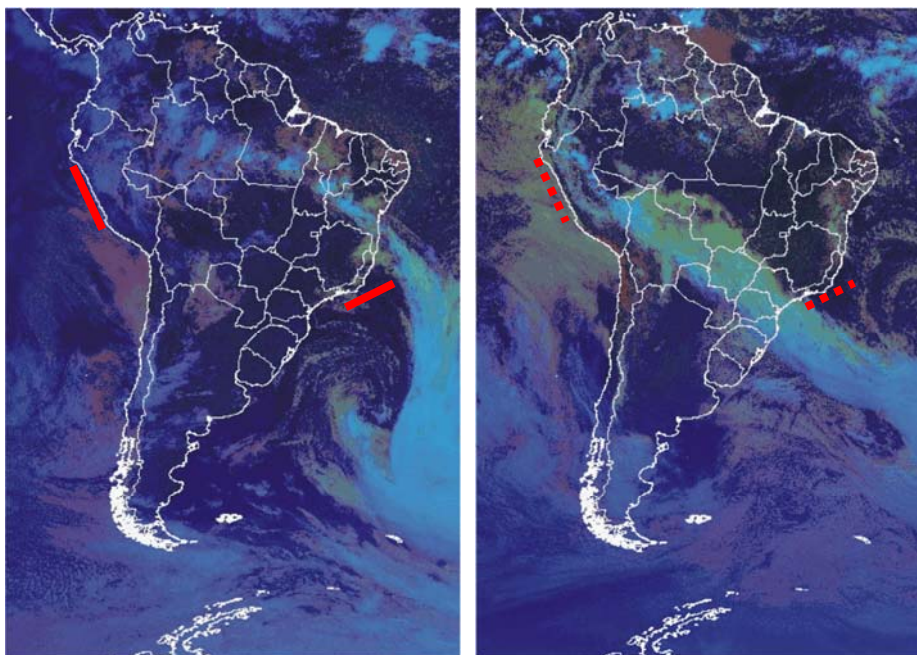
enregistrées en Afrique de l'Ouest, des migrations de la zone de convergence intertropicale (ZCIT) vers le sud et de l'aridité dans le Nordeste brésilien et dans certaines régions d'Amérique du Sud ; enfin, que (3) la variabilité de l'Atlantique Sud tropical est responsable des phases humides dans le nord-est de l'Amérique du Sud et également des sécheresses en Afrique du sud. Sur la base de ces télé-connexions, on peut penser que ces changements sont le résultat de l'intégration de ces principaux mécanismes dont la durée et l'amplitude spécifiques peuvent équilibrer, diluer ou favoriser l'expression de leurs actions sur les écosystèmes tropicaux. Il est clair que, pour mieux étayer ces variations et ces connections Océan-Atmosphère durant l'Holocène moyen, il est nécessaire de disposer de plus d'enregistrements de la variabilité des températures des eaux de surface tropicales dans le passé.

C'est pourquoi, le principal objectif de cette thèse est d'étudier la variabilité climatique Holocène par le biais des enregistrements organiques sédimentaires (figure I-1) :

1. des températures des eaux de surface de l'Atlantique Sud;
2. des températures des eaux de surface du Pacifique Est.

Ce travail a pour objet de répondre aux questions suivantes :

- 1) Les variabilités climatiques sont-elles synchrones de part et d'autre de l'Amérique du Sud ?
- 2) Les variations climatiques observées sur les marges occidentales et orientales de l'Amérique du Sud évoluent-elles parallèlement ?
- 3) Quelle est la durée de ces variations climatiques des deux côtés de l'Amérique du Sud



**Figure I-1** : Les deux régions d'étude, soumises à des influences climatiques différentes.

**Source** : Evangelista *et al.* (2007), version en couleur d'images de satellite météorologique gracieusement cédées par l'auteur.

## ***I.2. Structuration de la thèse***

Le présent travail se propose de conduire une étude multi-paramètres de la matière organique des sédiments marins dans le cadre d'une approche paléo-environnementale, ayant pour but de reconstituer et de comparer les évolutions des conditions océanographiques et climatiques de part et d'autre de l'Amérique du sud, au cours de l'Holocène. Cette thèse est partie intégrante de deux projets de coopération internationale entre l'IRD-CNPq<sup>1</sup> (CLIMPAST) et l'IRD-IMARPE<sup>2</sup> (PALEOPECES). Elle est structurée en cinq chapitres.

Ce premier chapitre introductif, destiné à préciser l'intérêt et les enjeux de la recherche proposée, est suivi d'un chapitre détaillant la méthodologie utilisée.

---

<sup>1</sup> CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

<sup>2</sup> IMARPE – Instituto del Mar del Perú



Dans un premier temps, une analyse par imagerie radiographique des carottes prélevées sur les sites brésilien et péruvien permet de décrire les faciès lithologiques, de préciser les structures sédimentaires et d'identifier les zones de bioturbation. La détermination de la teneur en eau sert ensuite à définir la densité réelle des échantillons.

Une deuxième étape a pour but la datation au carbone 14, et l'élaboration d'un modèle chronologique servant à la comparaison temporelle des échantillons.

La troisième étape concerne la matière organique sédimentaire. Après séparation et datation, celle-ci a été soumise à un ensemble d'analyses destinées à produire divers marqueurs paléoenvironnementaux : analyses pétrographiques (comptage et observation des palynofaciès), géochimiques élémentaires (dosage total du carbone, de l'azote et du soufre, rapport C:N), analyses géochimiques par pyrolyse Rock-Eval (pic S2, carbone organique total, indice d'hydrogène, indice d'oxygène), et enfin moléculaires (étude des n-alcanes et des alcénones). Ces différents marqueurs permettent, par recoupements, de déterminer avec précision les origines, les conditions de production et de transport, et l'état de préservation de la matière organique sédimentaire. L'objectif est de reconstituer les variations des conditions environnementales et climatiques au cours de l'Holocène : température des eaux de surface, phases de réchauffement / refroidissement, aridité / humidité, variations du niveau de la mer, dynamique des upwellings, notamment.

Les chapitres III et IV présentent les deux sites d'étude, respectivement le Cabo Frio au Brésil (site Atlantique sud-ouest), et le Callao sur la côte péruvienne (site Pacifique sud-est). Pour chacun de ces sites, nous avons fait le choix d'une structuration identique en trois parties, afin d'en faciliter la comparaison.

Une première partie décrit le cadre général, d'un point de vue océanographique (caractéristique des eaux marines, dynamiques d'upwelling et productivité primaire régionale), climatique (système et variabilité climatiques régionaux), et sédimentologique.

Une deuxième partie décrit les résultats des analyses pour chacun des sites : caractérisation des unités lithologiques, résultats des datations au carbone 14 et variations des taux de sédimentation au cours du temps. Suivent les résultats, présentés

par unités lithologiques, des analyses géochimiques élémentaires et celles obtenues par pyrolyse Rock-Eval, l'identification et la distribution des classes palynologiques, et enfin les marqueurs moléculaires que sont les n-alcanes et les alcénones. L'analyse des n-alcanes concerne l'étude de la longueur des chaînes, et l'utilisation du C<sub>33</sub> comme marqueur d'aridité sur les zones sources de la MOS ; les alcénones sont plus spécifiquement utilisés comme marqueur des paléotempératures des eaux superficielles (indicatives de l'intensité des *upwellings*.)

La troisième partie des chapitres III et IV propose une discussion sédimentologique pour chacun des sites, synthétisant, pour chaque unité lithologique et temporelle, les résultats validés par les marqueurs pétrographiques et géochimiques : variations du niveau marin, température des eaux de surface, origine et état de préservation de la MOS, aridité / humidité des zones sources de la MOS.

Le cinquième et dernier chapitre enfin propose une discussion générale fondée sur la comparaison des résultats obtenus pour les deux sites, à partir d'une analyse en composantes principales (ACP), et d'une analyse spectrale wavelet. Ce chapitre met l'accent sur l'étude du paléoclimat : identification et caractérisation des différentes phases de variation climatique pour chacun des sites, à différentes échelles spatiales et temporelles, et des éventuelles inter-connexions de la variabilité climatique de part et d'autre de l'Amérique du Sud. Ce travail sera mené à partir de l'étude détaillée de trois périodes-clef : le Dryas récent, l'Optimum holocène, et l'Optimum médiéval.

Le lecteur trouvera notamment en annexe les tableaux de données issues des différentes analyses et utilisées pour l'analyse des résultats.



## II – Introduction

### *II.1. Le climat et l'océan*

Les deux dernières décennies témoignent de la montée en importance des études liées au climat. De simples sujets de conversation sur le climat d'aujourd'hui et de demain, ses variations actuelles, passées et futures, aussi bien que ses impacts sur les sociétés humaines et l'environnement, sont passés à la Une de la presse non spécialisée. Il est désormais devenu évident que le mode de vie des individus affecte le climat, et non pas seulement que le climat conditionne la vie des individus. Le réchauffement climatique lié à l'activité humaine n'est plus aujourd'hui à démontrer et chacun s'aperçoit de la nécessité d'étudier l'évolution climatique.

Selon le glossaire du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat - GIEC<sup>3</sup> (1995), « le climat désigne généralement le “temps moyen”; il s'agit plus précisément d'une description statistique du temps en termes de moyennes et de variabilité de grandeurs pertinentes sur des périodes de plusieurs décennies (trois décennies en principe, d'après la définition de l'OMM). Ce sont le plus souvent des variables de surface – température, précipitations et vent, par exemple – mais au sens large le “climat” est la description de l'état du système climatique ».

Le climat, au sens large, est donc le fruit des jeux interactifs complexes entre des paramètres très divers. La mise en jeu de facteurs nombreux intervenant à des échelles très diverses est responsable d'une mosaïque complexe de climats régionaux. Ces facteurs sont partagés en deux catégories : 1 – ceux d'ordre cosmique et planétaire, liés à la mécanique céleste (paramètres orbitaux, activité solaire, forme et mouvement de la planète, etc.) ; et 2 – ceux qui composent les différents milieux terrestres (atmosphère, hydrosphère, lithosphère, biosphère, et leur répartition entre eux). Comprendre le climat en détail est rendu ardu par le mode non linéaire des interactions entre toutes ses composantes.

Les efforts au niveau mondial pour améliorer la compréhension, la modélisation et la prévision du climat ont été couronnés par le plus récent des rapports du GIEC<sup>4</sup>. Le GIEC a été créé en 1988 sous l'égide de l'Organisation Météorologique Mondiale et du Programme pour l'Environnement des Nations Unies, pour évaluer scientifiquement les menaces de changements climatiques liés aux activités anthropiques.

Encore d'après le glossaire du GIEC, le concept de changement climatique est défini différemment par le GIEC et par la CCUNCC<sup>5</sup> :

**« Changements climatiques selon la CCCC : changements de climat qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale, et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables.**

---

<sup>3</sup> *Changements Climatiques : un glossaire du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (1995)* (<http://www.ipcc.ch/pdf/glossary/ipcc-glossary.pdf>)

<sup>4</sup> Aussi connu par son appellation anglaise IPCC : *Intergovernmental Panel on Climate Change*

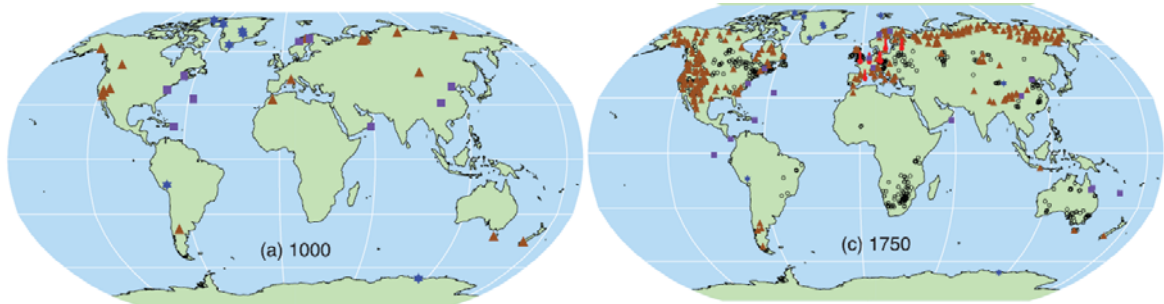
<sup>5</sup> CCCC - Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques

*Changements climatiques selon le GIEC : les changements climatiques signalés dans les relevés climatologiques sont attribuables aux variations internes du système climatique ou des interactions entre ses composantes, ou aux modifications du forçage externe d'origine naturelle ou anthropique. Il n'est généralement pas possible d'établir clairement les causes. Dans les projections qu'il établit sur l'évolution du climat, le GIEC ne tient généralement compte que de l'influence sur le climat de l'augmentation des gaz à effet de serre imputable aux activités humaines et d'autres facteurs liés à l'homme. ».*

Il est clair que le climat de nos jours a été, et continuera à être influencé à la fois par les variations d'origine naturelle et par l'activité humaine, dont l'impact tend à affaiblir ou à renforcer la variabilité naturelle. Faire la part entre ces deux acteurs, l'homme et la nature, est la question majeure, cela depuis le Sommet International de Rio de Janeiro en 1992, jusqu'à la Conférence de Bali en 2007, en passant par le Protocole de Kyoto en 1997.

Malgré tous ces efforts, il reste encore beaucoup à faire, surtout dans l'hémisphère sud, où les études sont moins nombreuses et les fonctionnements climatiques encore mal connus. La figure II.1-1, tirée de la synthèse et du 4<sup>ème</sup> rapport du GIEC, montre clairement ce manque d'informations sur l'hémisphère austral (figure II-1).

Appréhender les fonctionnements qui produisent les oscillations climatiques et engendrent les modes de variation du climat est devenu l'objectif primordial des recherches sur le climat. Les enjeux sont de taille, et reposent sur la capacité de prédiction fiable du climat, dont la compréhension passe impérativement par la mesure et la documentation des variabilités naturelles du climat passé. Décrypter les souvent très complexes rétroactivités existantes entre le mode naturel et celui surimposé par l'action anthropique, représente aussi une tâche très importante s'agissant des décisions et mesures à prendre pour réduire l'impact des activités humaines.



**Figure II-1** : Localisation des séries de données atteignant (a) 1000 AD et (c) 1750 AD, utilisées par le GIEC pour reconstituer les températures des hémisphères nord et sud (Jansen *et al.*, 2007).

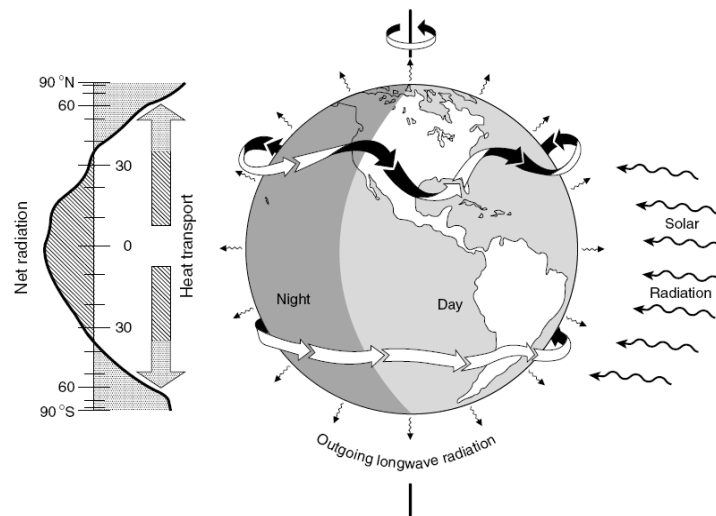
**Légende** : thermomètres rouges - données instrumentales ; triangles marrons - cernes d'arbres ; cercles noirs - *boreholes* ; étoiles bleues - carottes de glace ; carrés pourpres - autres registres de basse résolution.

Dans la machine climatique, les phénomènes et les variations du climat en général puisent leurs sources à partir de l'énergie radiative du soleil reçue par la Terre (figure II-2). En toute logique, on peut affirmer que les océans sont une pièce de première importance dans les engrenages de cette machine climatique. Ils couvrent à eux seuls 71% de la surface du globe et contiennent 97% de l'eau mondiale. L'atmosphère, comparée à l'océan, n'a pas une aussi grande capacité de rétention de chaleur : sa capacité est celle d'une couche océanique d'environ 3,2 mètres. Confrontées à l'océan, les terres émergées ont des capacités thermiques de 2 à 4,5 fois inférieures. Par ailleurs, les terres ont aussi une conductivité thermique<sup>6</sup> faible. Tout ceci rend les surfaces continentales et l'atmosphère plus réactives dans l'espace et dans le temps, jouant ainsi un rôle plus important dans la variabilité régionale et locale du climat aux échelles temporelles courtes. Quant aux océans, leur grande capacité de stockage et de redistribution de chaleur, ainsi que leur haute inertie, associées à leurs mouvements circulatoires, font qu'ils sont les principaux acteurs de la régulation du climat global sur le long terme. De cette manière les sédiments océaniques sont en mesure d'archiver et ainsi de fournir une certaine mémoire du système climatique à différentes échelles temporelles (Trenberth, 2004).

Reçue sous forme radiative (Figure II-2), principalement par la zone tropicale, la chaleur est redistribuée par les océans et l'atmosphère vers les pôles qui en sont

<sup>6</sup> La conductivité thermique désigne le degré auquel une substance transmet la chaleur

déficitaires. La différence de température ainsi existante entre les pôles et les tropiques, génère une large circulation atmosphérique (vents d'ouest) sous forme de courant de jet, à environ 10 km de la surface de la terre. Le déplacement de ce courant de jet sur diverses superficies (océans, terre, montagnes, déserts, forêts, etc), produit des ondulations au sein de l'atmosphère, qui à leur tour structurent géographiquement le climat (Trenberth *et al*, 1996).



**Figure II-2** : Schéma du bilan énergétique annuel de la planète, et de la circulation atmosphérique primaire qui en découle (Trenberth, 2001).

Une fois décrits les grands cycles climatiques et élaborées les théories des changements du climat, la communauté scientifique a recentré son effort sur la caractérisation des impacts de ces changements sur les écosystèmes continentaux aux échelles locales et régionales. La recherche et le développement de nouveaux outils analytiques de haute précision en géochimie isotopique, moléculaire et élémentaire, alliés à l'existence dans la nature d'enregistreurs de très haute résolution, que ce soit en domaine marin (coraux, coquilles, sédiments laminés, etc.) ou en domaine continental (spéléothèmes, glaciers, sédiments varvés, cernes d'arbres, etc.), permettent d'appréhender les changements environnementaux et climatiques à des échelles de temps séculaires, décennales, et même interannuelles.

L'évaluation des séries de mesures instrumentales du climat ont permis la connaissance de certains modes d'oscillation « haute fréquence », c'est-à-dire d'échelles



temporelles d'ordre saisonnier à décennal, voire multi-décennal, tels que l'Oscillation Nord Atlantique, l'Oscillation Décennale Pacifique, ou l'Oscillation Sud<sup>7</sup> (figure II-3). La durée d'enregistrement de ces séries de données est néanmoins trop courte pour permettre de détecter d'autres gammes de variabilités climatiques naturelles, ce qui limite l'applicabilité des études paléoclimatiques aux derniers siècles. De plus, ces séries, mêmes les plus longues, sont presque exclusivement restreintes à l'hémisphère nord, surtout à l'Europe et à l'Amérique du Nord (figure II-1).

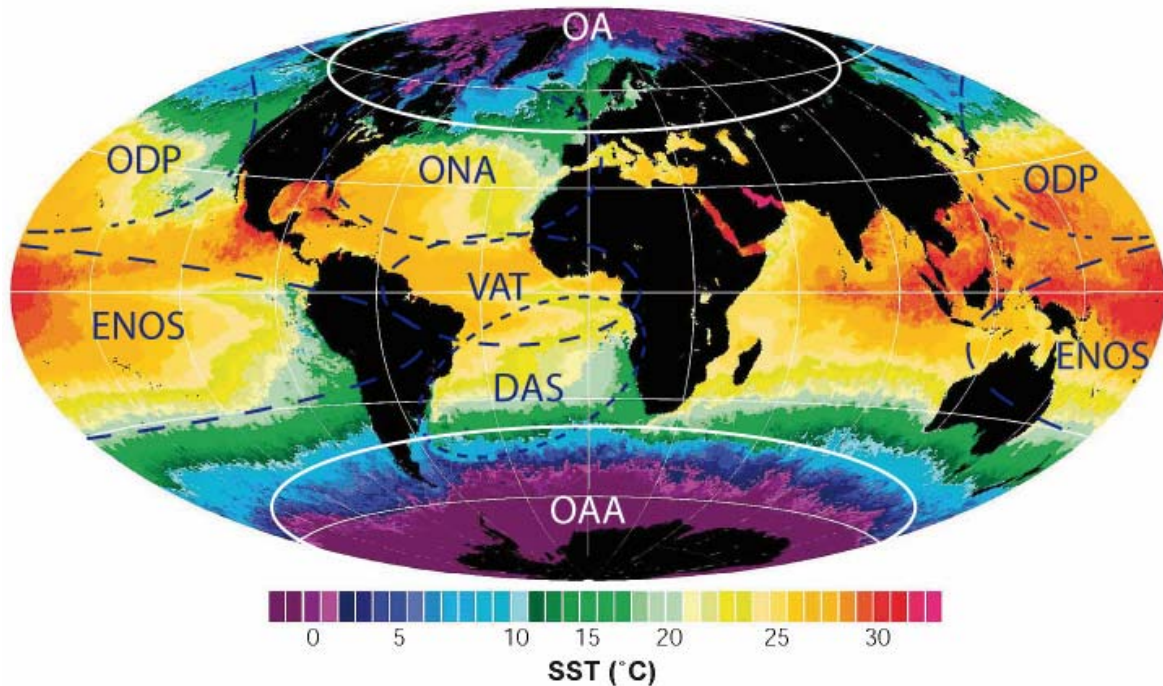
La compréhension des mécanismes générateurs du climat nécessite de documenter sa variabilité naturelle. Si les données instrumentales ont décrit différents modes d'oscillation de fréquences saisonnières, décennales ou pluri-décennales (*NAO*, *SO*, *PDO*)<sup>5</sup> et leurs possibles télé-connexions, elles sont d'une durée trop courte (échelle d'un siècle ou deux) pour appréhender toute la gamme de variabilité naturelle. La modélisation du climat global par les simulations numériques a elle aussi besoin de données climatiques, en particulier pour les périodes passées durant lesquelles les modalités, ou les mécanismes, du climat étaient distincts de ceux observés actuellement. Dans ce contexte, la paléoclimatologie, qui cherche à identifier dans les enregistrements des environnements passés des paramètres climatiques mettant en évidence les variations significatives de l'environnement, apparaît primordiale.

La reconstruction des climats passés sur des périodes plus importantes, aux échelles géologiques, demande donc l'emploi de méthodes indirectes, appuyées sur des techniques d'analyse spécifiques. Ces études paléoclimatiques à l'échelle multi-séculaire sont basées le plus souvent sur des archives sédimentaires lacustres ou marines, carottes de glace ou coralliennes, spéléothèmes et cernes d'arbres. L'étude de ces archives du climat fait appel à des approches qui relèvent de la paléocéanographie, de la sédimentologie, la géochimie, la palynologie, la micropaléontologie, notamment. Les paléoclimatologues cherchent de cette façon à reconstituer les modifications de l'environnement résultant des variations passées du climat. Les indicateurs de ces modifications peuvent être liés aux variations de la température ou de la salinité

---

<sup>7</sup> Aussi connues par leurs acronymes anglophones : *North Atlantic Oscillation (NAO)*, *Pacific Decadal Oscillation (PDO)*, et *Southern Oscillation (SO)*.

marines, des fluctuations des précipitations, des rapports de durée entre les saisons sèches/humides, ou d'autres expressions du climat.



**Figure II-3 :** Quelques exemples de variabilités climatiques décennales : El-Niño / oscillation sud (ENOS), oscillation décennale du Pacifique (ODP), oscillation nord Atlantique (ONA), variabilité de l'Atlantique tropical (VAT), dipôle de l'Atlantique sud (DAS) et les oscillations polaires arctique (OA) et antarctique (OAA).

**D'après :** carte de la distribution globale des températures de surface de la mer en période nocturne au mois de juillet 2002 (Sirocko, 2003).

L'une des grandes difficultés rencontrées, quand on compare les informations paléoenvironnementales obtenues dans différents secteurs géographiques, est la diversité des méthodes appliquées et des marqueurs utilisés. L'un des buts de ces études est d'établir des modèles géochronologiques pour interpréter les changements climatiques régionaux et globaux à différentes échelles temporelles. Cette diversité méthodologique, alliée aux incertitudes de sensibilité de ces marqueurs aux réponses spécifiques des systèmes naturels aux changements climatiques, y compris l'impact anthropique, rend difficile la capacité de prévision, et par conséquent la prévention des

impacts futurs de ces changements. Les larges lacunes dans la couverture spatiale et les informations contradictoires fournies par des types de données distincts, défient les paléoclimatologues dans leur tâche de connaissance des climats, et les poussent à trouver de nouveaux moyens de les inférer.

## ***II.2. Paléoclimatologie de la région tropicale***

Toutes les parties du globe subissent les perturbations climatiques nées des interactions océan-atmosphère, mais les régions tropicales, très longtemps cantonnées à un rôle secondaire, sont particulièrement vulnérables aux variations du climat, tels la mousson et El Niño. Leur fragilité dépend de deux facteurs majeurs :

- (1) Les économies des pays de cette partie du monde, très souvent fondées sur l'exploitation du milieu naturel et l'agriculture, sont intimement dépendantes des conditions climatiques ;
- (2) Il existe aussi une « sensibilité géophysique » (Merle, 2006) particulière aux basses latitudes : leur proximité de l'équateur, zone la plus active en apports radiatifs et d'intense redistribution de cette énergie, leur fait subir des manifestations d'oscillations climatiques sous un large spectre, de courtes et violentes à longues et durables. Les répercussions des impacts climatiques sous les tropiques se fait sentir à l'échelle mondiale, par l'intermédiaire de la dépendance des pays extratropicaux aux productions agricoles de cette zone par exemple.

Alors que, aux échelles millénaires, l'origine des grands changements climatiques est classiquement recherchée dans l'Atlantique Nord, la communauté scientifique s'interroge sur le rôle des tropiques dans la dynamique climatique, notamment en ce qui concerne les variations de flux de chaleur et de vapeur d'eau. Certains auteurs supposent par exemple qu'à l'échelle millénaire les variations du cycle

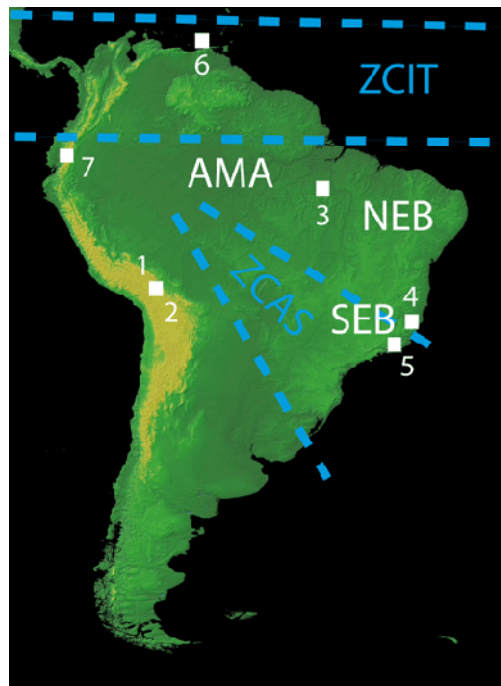
hydrologique en zone tropicale participent à la modulation de la circulation thermohaline, et donc à la régulation du climat. Sur des échelles de temps plus courtes, d'autres auteurs considèrent que les variations abruptes du climat dans l'Atlantique Nord (*NAO*) depuis les années 1950 trouvent *pro parte* leur origine dans les variations atmosphériques induites par les anomalies de température à la surface de l'océan tropical. A l'échelle millénaire, comme à l'échelle décennale ou interannuelle, les tropiques semblent donc jouer un rôle clé mais encore mal compris sur la variabilité climatique naturelle.

L'étude des variations climatiques à des échelles séculaires à millénaires fait intervenir des paramètres d'ordre astronomique (les variations d'insolation) et d'autres de nature encore mal connue. Des variations séculaires des conditions climatiques, tels que l'Optimum Médiéval ou le Petit Âge Glaciaire, ont affecté les régions tropicales. La reconstitution des conditions climatiques et de leur variabilité au cours du dernier (ou des deux derniers) millénaire(s) constitue un premier pas dans l'étude des relations entre les latitudes moyennes de l'hémisphère nord et la zone intertropicale, et des mécanismes impliqués. À une échelle pluri-millénaire, ou à celle des grands cycles interglaciaires, les recherches poursuivies tendent à préciser les variations de l'« état moyen du climat » à des périodes-clé telles l'Holocène moyen, le Dryas récent, le dernier maximum glaciaire, ou les maxima thermiques des derniers interglaciaires (120, 210, 330, 440 kannées).

L'étude sur le long terme de la variabilité des climats tropicaux se justifie donc en partie par une demande politique et sociale de mieux comprendre les modalités des variations d'intensité des pluies saisonnières, ou de durée des sécheresses périodiques. Il nous est, par exemple, demandé de déterminer si les fréquences et les intensités de manifestations d'El Niño sont susceptibles d'évoluer, et dans quel sens, dans un monde soumis à un réchauffement généralisé. Là encore, ce n'est que par une étude détaillée des occurrences passées du phénomène El Niño, en période plus chaude (Optimum Médiéval, Holocène moyen, interglaciaires précédents), ou plus froide (Petit Âge Glaciaire, Dernier Maximum Glaciaire), par rapport aux conditions actuelles, que l'on pourra apporter des éléments permettant de modéliser et de prévoir l'évolution

des conditions climatiques et leurs impacts lors des prochaines décennies et siècles à venir.

En Amérique du Sud, les différentes études publiées à ce jour (figure II-4) ont montré que l'Holocène moyen était caractérisé par une forte variabilité climatique bien marquée par l'existence d'un climat plus sec que le climat actuel. Cette hypothèse se base notamment sur le bas niveau du lac Titicaca (Mourguiart *et al.*, 1998 ; Abbott *et al.*, 2003), sur les fortes teneurs en poussières contenues dans les carottes de glace du Sajama (Thompson *et al.*, 1998), sur les paléo-incendies amazoniens (Soubiès 1980 ; Sifeddine *et al.*, 1994 et 2001 ; Turcq *et al.*, 1998 ; Cordeiro, 2008), sur l'ouverture de la végétation dans le Sudeste brésilien (Ledru, 1993), et sur la permanence d'une végétation ouverte dans la forêt atlantique (Behling 1997). Au moins en partie, ces phases de climat sec peuvent être associées à la faible insolation qui existait durant cette période. Cependant, l'étude des paléo-incendies à Carajas a montré que cette



**Figure II-4 :** Exemples de sites d'études paléoclimatiques dans l'Amérique du Sud : 1 – Lac Titicaca, 2 – Glacier du Sajama, 3 – Carajas, 4 – Rio Doce, 5 – Cabo Frio, 6 – Bassin de Cariaco, et 7 – Lac Palacocha. AMA – Amazonie, NEB – Nordeste brésilien, SEB – Sudeste brésilien, ZCIT – zone de convergence intertropicale, ZCAS – zone de convergence de l'Atlantique sud.

période sèche (Turcq *et al.*, 1998; Sifeddine *et al.*, 2001 ; Cordeiro *et al.*, 2008) était, en réalité, composée de plusieurs événements secs pluri-annuels intercalés avec des phases humides. L'existence de plusieurs phases d'inversion du sens de la dérive littorale enregistrée dans les cordons littoraux de la plaine côtière du Rio Doce entre 5 100-3 900 ans <sup>14</sup>C BP (Martin *et al.*, 1984 ; Martin et Suguio, 1992), liées à des modifications du régime des houles et donc de celui des vents, confirme cette variabilité. Ces inversions paraissent être la conséquence de la formation d'une zone de blocage des fronts froids dans le sud du Brésil. Ce phénomène serait lié à l'intensification de la Zone de Convergence Atlantique Sud durant les années "El-Niño". Ces inversions sont du type de celle qui s'est produite en 1983 à la suite du blocage des advections polaires résultant d'un important événement El-Niño (Martin *et al.*, 1984, 1991, 1993, 1995). Cependant, les inversions enregistrées dans la plaine côtière du Rio Doce, qui ont eu des durées de plusieurs dizaines d'années, ne peuvent être le résultat de paléos El Niño. Il est plus logique de parler de conditions de type El Niño ayant eu des durées du même ordre de grandeur (Martin *et al.*, 1993 et 1995). Par ailleurs, l'étude des associations de coccolithophoridés et des foraminifères des carottes prélevées dans la Zone de l'*Upwelling* de Cabo Frio, (Mestrado d'Alice Candido da Silva, Laslandes *et al.*, 2007a), et des associations de diatomées de carottes de lagunes côtières de la même région (Laslandes *et al.*, 2006 ; Sylvestre *et al.*, 2005), montrent, à la même époque, la présence d'associations d'espèces de foraminifères planctoniques d'eaux chaudes associées à des phases de faible productivité de coccolithophoridés et de diatomées hypersalines dans les lagunes. Ceci implique en fait soit un affaiblissement de l'intensité de l'*upwelling* intermittent de Cabo Frio qui est contrôlé principalement par les Alizés du Nord-est, lesquels seraient bloqués au nord du Cabo Frio, soit une diminution de l'intensité des Alizés due à la variabilité de l'Atlantique Sud Tropical (Martin *et al.*, 1988).

Pour la même période, Haug *et al.* (2001) et Peterson *et al.* (2006) ont montré, à partir d'un enregistrement de très haute résolution du rapport Ca/Ti traduisant l'érosion des bassins versants du bassin de Cariaco, que le déplacement de la ZCIT a connu d'importants changements liés aux variations de l'insolation et à des interconnexions avec le Pacifique Est (ENSO). Ces auteurs montrent à partir de 5 400

ans cal BP l'installation de conditions climatiques plus arides qui s'intensifient de 3 900 à 2 800 ans cal BP. Ces changements seraient dus aux déplacements de la ZCIT vers les moyennes latitudes et contrôlés par la variabilité climatique du Pacifique. Effectivement, les données disponibles dans le Pacifique Est montrent vers 5 500 ans cal BP un changement dans la variabilité climatique marquée par le début de l'installation des conditions El Niño qui s'intensifient vers 3 900 ans cal BP (Rodbell *et al.*, 1999 ; Sandweiss *et al.*, 2001 ; Jenny *et al.*, 2002; Laubere *et al.*, 2003 ; Keefer *et al.*, 2003 ; Rein *et al.*, 2005 et 2007). Par ailleurs, Moy *et al.* (2002), à partir de l'étude des sédiments de la lagune Pallacocha (Équateur), située dans une région très sensible aux phénomènes ENSO, montre que la fréquence de ces événements devient notable à partir de 5 500 et augmente entre 3 600 et 2 000 ans cal BP. Actuellement, le positionnement de la ZCIT dans l'Hémisphère Nord près de l'équateur est principalement lié aux températures de surface froides du Pacifique Est (Haug *et al.*, 2001 ; Peterson *et al.*, 2006). Durant certains phénomènes El-Niño, le déplacement de la ZCIT vers le Pacifique, en conséquence des TSM anormalement chaudes, peut provoquer également de la sécheresse dans certaines régions du Nord-est de l'Amérique du Sud. Cette irrégularité est en partie due au fait que les événements El-Niño présentent des différences régionales importantes (Ortlieb & Macharé, 1993). Il n'est pas de même certain que la variabilité du déplacement de la Zone de Convergence Intertropicale soit seulement sensible au phénomène ENSO, elle peut également être contrôlée par les variations latitudinales. En effet, Peterson *et al.* (2006), Newton *et al.* (2006) et Sifeddine *et al.*, *in press* ont interprété que, durant la période correspondant au Petit Âge Glaciaire en Amérique du Sud, les phases sèches et humides enregistrées respectivement dans les carottes marines du Bassin de Cariaco, et dans celles de la région Indo-Pacifique et du Pacifique Est sont dues principalement à un déplacement de la ZCIT vers les basses latitudes.

L'oscillation Pacifique ne serait donc pas la seule responsable de cette variabilité durant l'Holocène, il est vraisemblable que les variations de température de l'Atlantique Tropical jouent également un rôle. Effectivement, lorsqu'on compare les données du Nordeste brésilien (Sifeddine *et al.*, 2003 ; Sifeddine en préparation) avec celles de l'Afrique (Roussell *et al.*, 2003 ; Ning Shi *et al.*, 2001 ; et Lee Thorp *et al.*,

2001), on note l'existence d'une opposition de phase entre les enregistrements de chaque côté de l'Atlantique. Alors que le Nordeste brésilien est sec entre  $\approx 5\,500$  et  $3\,900$  ans cal BP, ainsi que la majorité des régions de l'Amérique du Sud tropicale, l'Afrique de l'Ouest enregistre une phase climatique humide. Cette situation s'inverse à partir de  $3\,900$  ans cal BP où on note un retour à des phases plus humides en Amérique du Sud et le début de l'installation d'une phase sèche en Afrique. Une des hypothèses émises est que ces tendances sont probablement liées à la variabilité des températures des eaux de surface (TSM) de l'océan Atlantique sud. Cette hypothèse est confortée par les résultats de Ning Shi *et al.* (2001), qui enregistrent un refroidissement des températures des eaux de surface, et confirmée par des données continentales (Lee Thorp *et al.*, 2001) qui montrent un début d'installation de conditions plus arides et plus froides vers  $3\,200$  ans cal BP. Ces changements synchrones sont probablement liés à la baisse des TSM après environ  $3\,200$  ans cal BP.

### ***II.3. Les zones d'upwelling : la dynamique des grands producteurs de matière organique***

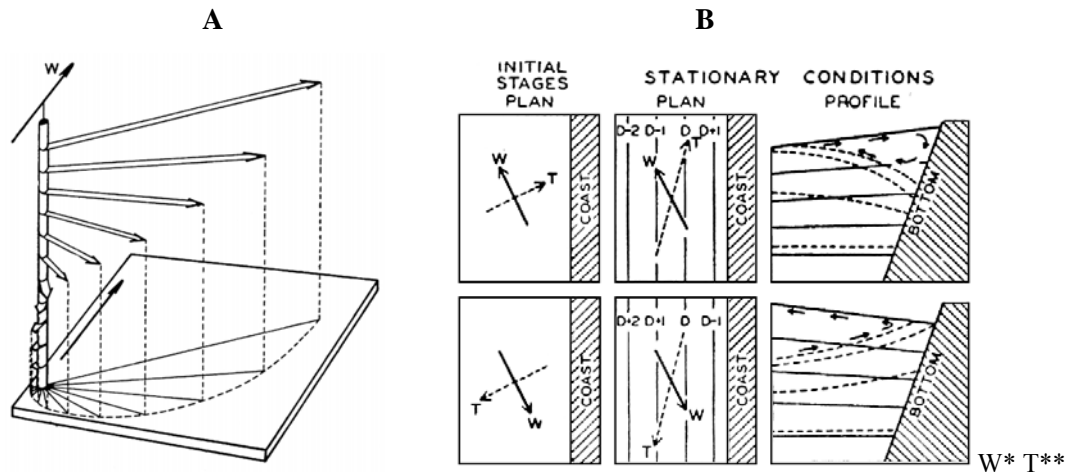
*« Upwelling : Terme anglo-saxon désignant les remontées d'eaux profondes froides, généralement sous l'action du vent, le long d'une frontière qui peut être une côte ou l'équateur ; ... »*

Merle (2006)

Physiquement, la circulation océanique générale est créée par la contrainte éolienne exercée par les vents sur de vastes surfaces de l'océan ouvert. Cette circulation, axée sur la direction du vent, est déviée progressivement en profondeur sous l'effet de la force de Coriolis (due à la rotation de la Terre), par rapport à sa direction initiale de déplacement, sous la forme d'un escalier en colimaçon, la spirale d'Ekman : vers la droite dans l'hémisphère Nord et vers la gauche dans l'hémisphère Sud (figure II-5). Cette circulation génère un transport total par des courants perpendiculaires à la direction des vents (à droite ou à gauche selon la latitude), qui est



de grande importance car le transport des couches superficielles prend une part prééminente dans la génération et le mode de déplacement des courants océaniques (Sverdrup, 1946) comme la circulation thermo-haline, par l'altération de la distribution des densités.



**Figure II-5 :** (A) La spirale d'Ekman est la représentation d'un courant généré par le vent en eaux profondes, et montre la réduction de l'intensité et le changement de direction à des intervalles réguliers de profondeur.  
(B) Schéma de l'effet du vent sur la production d'un courant parallèle à la côte dans l'hémisphère nord. En haut, une condition de « *downwelling* » proche de la côte, et en bas une condition d'« *upwelling* » (Sverdrup, 1946).

\*W – direction du vent ; \*\*T – direction du transport total

Dans les régions côtières de bord Est, les eaux plus ou moins chaudes et légères de la surface sont transportées vers le large, et remplacées par des eaux subsuperficielles plus froides et plus denses. Ce phénomène de remontée d'eaux profondes, connu sous le nom d'*upwelling*, représente un mécanisme important de la circulation océanique au niveau de la plateforme continentale. La compréhension des impacts causés par ce mécanisme et de ses conséquences sur les écosystèmes naturels est indispensable face à l'augmentation des activités humaines dans la zone littorale. Même si les zones d'*upwelling* représentent seulement 1% de la superficie totale des océans, elles contiennent plus de 50% du stock mondial des ressources halieutiques

(Rodrigues, 1973), du fait que ce phénomène agit directement sur les mécanismes qui contrôlent la productivité biologique locale (Mesquita *et al.*, 1989).

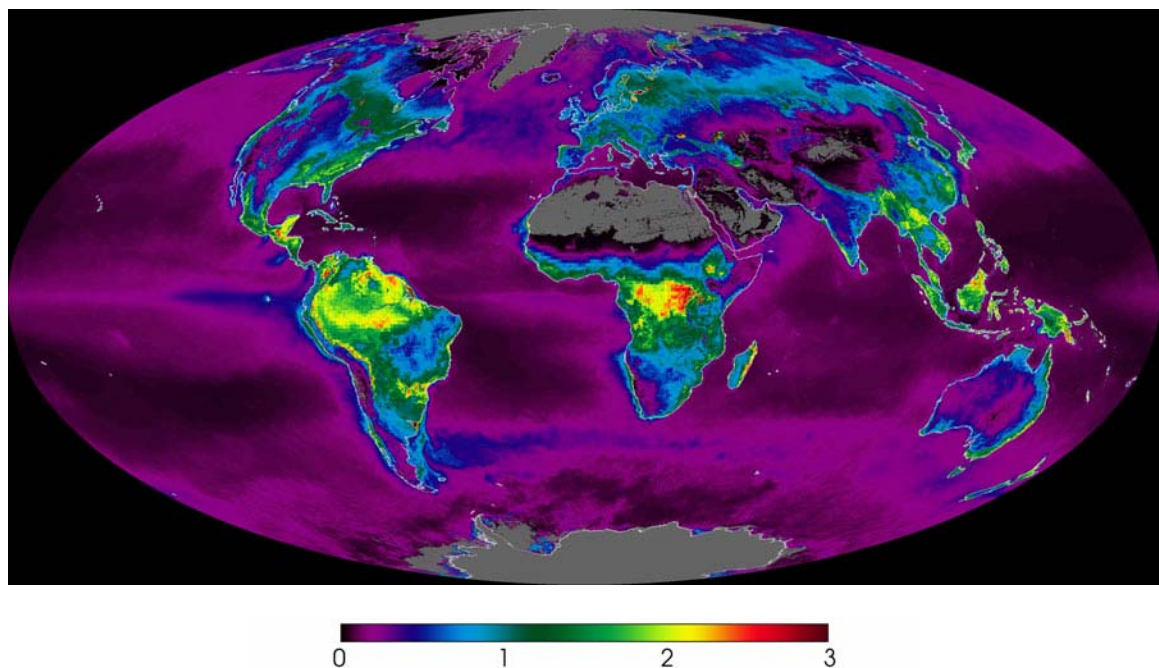
Une autre caractéristique importante de la circulation globale est l'empilement, encore sous l'effet de la rotation terrestre (géostrophie), des eaux sur les bords occidentaux des océans, et par conséquent la réduction du niveau de la mer sur les bords opposés. Or le résultat de cette conjugaison de facteurs est la forme la plus répandue d'*upwelling* : celle liée aux courants de bord est des océans. Certaines zones qui ne remplissent pas ces conditions peuvent aussi présenter des remontées d'eaux profondes (*upwelling*) générées par d'autres mécanismes ou par des conditions géographiques particulières. Un des mécanismes possibles est la vorticité générée par l'influence de brusques changements de profondeur, comme celles rencontrées sur les bordures de plateforme continentale (Campos *et al.*, 2000). Ces vortex cycloniques possèdent un effet de pompage des eaux plus profondes assez efficace, présentant le plus souvent un nucleus froid.

Le flux de masse d'eau dirigé vers le large est compensé par un flux de subsurface, dirigé vers le continent, qui émerge à proximité des côtes.    leur tour ces eaux vont être dirigées vers le large en se réchauffant progressivement, et en repoussant les eaux océaniques vers le large, refermant ainsi la boucle. Garret (1991) indique que des vitesses de vent de l'ordre de 5 à 10 m\*s<sup>-1</sup> sont nécessaires pour amorcer un phénomène d'*upwelling*. La topographie du plateau ainsi que l'orientation des vents et la position de l'axe de stress éolien maximum par rapport à la côte sont des paramètres qui déterminent le taux et la géométrie de l'*upwelling* (position du centre de l'émergence, par exemple) (Summerhayes, 1995).

  tant donnée l'ampleur limitée d'action en profondeur (~ 200m), les *upwellings* font remonter des eaux intermédiaires vers la surface, près des côtes. Ces eaux intermédiaires proviennent, elles, d'un mélange d'eaux superficielles qui ont plongé au niveau des zones de confluence subpolaires ou subtropicales. Depuis leur formation, ces eaux se sont progressivement enrichies en nutriments libérés lors de la décomposition des particules dans la colonne d'eau, et par la turbulence appliquée au fond lors de leur ascension vers la surface. Le surplus de cette matière produite qui n'est pas régénérée favorise une exportation importante de matière organique vers le

fond océanique. Les nutriments ainsi apportés en surface permettent aux organismes phytoplanctoniques puis zooplanctoniques de proliférer.

Antoine *et al.* (1996), à partir de la mesure par satellite de la couleur de l'océan, montrent que les productions primaires associées aux quatre systèmes d'*upwelling* des bords est des océans sont comprises entre 1 et 2,5 g C\*m<sup>-2</sup>\*j<sup>-1</sup>, le plus productif étant celui du Benguela, suivi des systèmes des Canaries, de Humboldt puis de Californie (figure II -6). Le système de Somalie-Oman-Socotra, dans l'océan Indien, n'est pas lié à des courant de bord est, mais son fonctionnement physique et son intensité sont néanmoins comparable aux quatre autres systèmes.



**Figure II-6** : Productivité moyenne annuelle nette terrestre et océanique durant l'année 2002 à la surface du globe (kg C\*m<sup>-2</sup>\*an<sup>-1</sup>).

**Source** : <http://earthobservatory.nasa.gov/Newsroom/NPP/npp.html>

## ***II.4. La matière organique sédimentaire***

### **II.4.1. Un outil porteur de paléo-informations**

Bien qu'elle représente, de manière générale, une fraction mineure des sédiments marins, la matière organique (MO) renferme en soi une large gamme d'informations importantes pour la reconstitution des paléoenvironnements. La concentration de matière organique dans les sédiments marins est très variable. Alors qu'elle est faible dans les sédiments marins déposés en océan ouvert, sa concentration augmente et atteint des pourcentages élevés dans les sédiments à grain fin déposés sur la plateforme continentale (Calvert, 1987). On rencontre en particulier des proportions élevées de MO dans les systèmes d'*upwelling* côtiers, car la haute productivité biologique observée dans ces zones induit un important flux de matériel organique vers le fond (Valdes *et al.*, 2004). Ainsi, dans ce type d'environnement, la teneur en carbone organique des sédiments peut atteindre facilement les 10% (Libes, 1992 ; Haies et Keil, 1995), alors que les valeurs moyennes des zones océaniques varient entre 0,2% et 0,4% (Müller et Suess, 1979 ; Duan, 2000).

La quantité et la qualité des informations géochimiques rencontrées dans cette « fraction sédimentaire mineure », sont diamétralement opposées à sa proportion dans les sédiments. La qualité et la quantité de la MO des sédiments marins dépendent en effet des processus de préservation/dégradation de ses divers composants dans l'environnement de dépôt. L'exportation de la MO de la surface vers le fond change de manière significative dans les différentes régions océaniques (Mollenhauer *et al.*, 2004). Les taux de transit les plus importants sont observés le long des marges continentales, et en particulier dans les zones d'*upwelling* (Berner, 1982 ; Fischer *et al.*, 2000).

Les sédiments marins accumulés dans des zones situées près des zones d'*upwelling* fournissent de bonnes informations sur l'évolution au cours du temps des conditions océanographiques (Martinez *et al.*, 2000; Bertrand *et al.* 2003). Dans des circonstances très favorables, les sédiments peuvent enregistrer les conditions physico-chimiques de

la colonne d'eau avec une très haute résolution temporelle. En fonction du taux de sédimentation et des processus biologiques locaux, les séquences sédimentaires peuvent fournir des enregistrements dont la résolution temporelle peut atteindre la saison, l'année, la dizaine d'années ou la centaine d'années.

La matière organique sédimentaire est un outil puissant pour des études environnementales paléoclimatiques/paléocéanographiques : cette MO ayant un effet de mémoire, enregistre les conditions environnementales par les modifications qu'elle subit dans les différents environnements qu'elle croise pendant son transit le long de la colonne d'eau et son enfouissement.

### **II.4.2. La matière organique dans le contexte océanique : de la production dans la colonne d'eau aux changements post-ensevelissement**

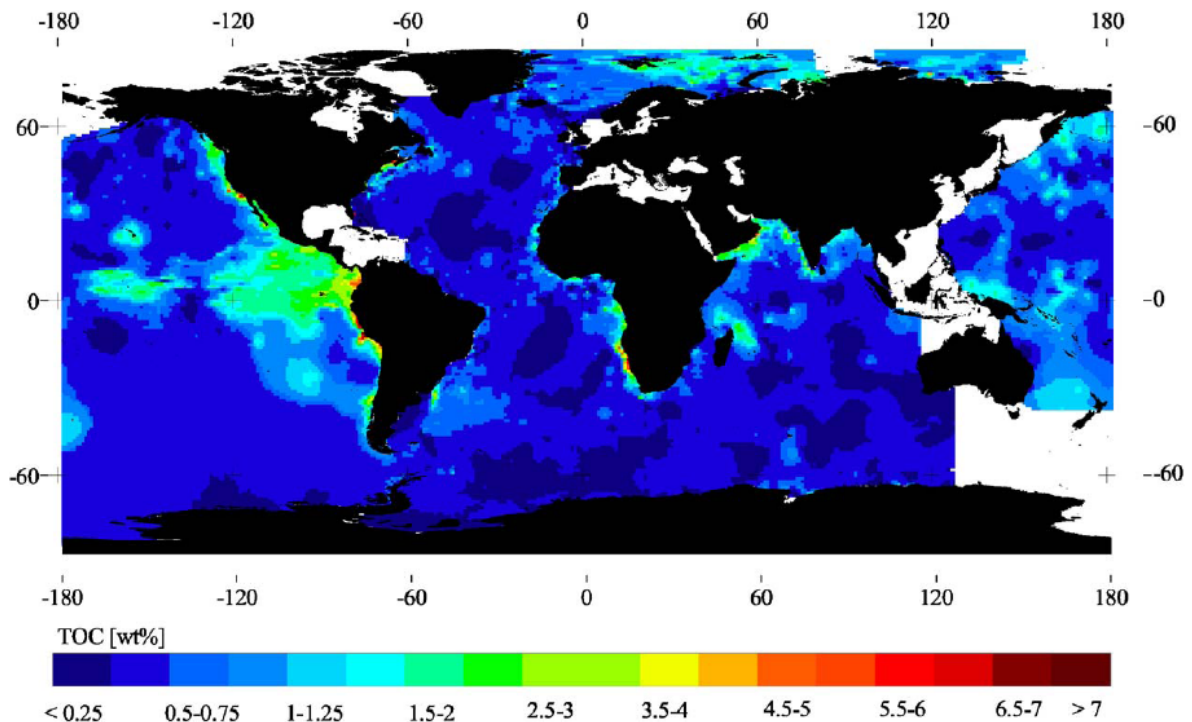
La sédimentation organique en milieu marin montre que l'accumulation de la matière organique est le résultat d'un concours favorable de diverses actions : une productivité primaire élevée, modulée de manière complexe par le taux de sédimentation (diminution du temps de résidence du matériel à la surface des sédiments, nature de phase minérale : détritique x biogénique, profondeur de la colonne d'eau, distance de la côte, etc.) (Bertrand *et al.*, 2003; Huc *et al.*, 2001; Tissot & Pellet, 1981; Pellet, 1981), peut créer de bonnes conditions de préservation de la MO au sein de son environnement de dépôt. Les principaux facteurs de préservation de la matière organique reconnus, jusque dans les années 1980, étaient le développement de conditions anoxiques dans les eaux de fond (Demaison & Moore, 1980), et l'épaisseur de la tranche d'eau (Suess, 1980).

La production primaire peut être définie comme la fixation de carbone par voie autotrophe. Elle est alimentée par l'apport de nutriments en surface, où les conditions de lumière permettent aux organismes phytoplanctoniques et

zooplanctoniques de proliférer. Cet apport de nutriments se fait en règle générale par voie fluviale et par les *upwellings*, près des côtes et en océan ouvert. L'apport atmosphérique peut se montrer important dans certains cas/zones (Romankevich, 1984), comme, par exemple, les aérosols apportés à partir du Sahara qui fertilisent les zones océaniques ouvertes en fer, élément dont l'absence limite souvent la productivité.

Une partie de la biomasse ainsi synthétisée est exportée vers le fond des océans, où la fraction non dégradée formera une proportion parfois importante du sédiment (figure II-7). Cette exportation est variable selon les conditions trophiques du milieu. Les organismes adaptés aux conditions eutrophiques génèrent une exportation importante de matière (30% de la production primaire). Les particules produites dans ces conditions tendent à être de grande taille (formées par agglutination ou de pelotes fécales) et sédimentent plus rapidement, sous forme de « neige marine ». D'autre part, les conditions oligotrophes favorisent davantage le recyclage et exportent moins de matière (10% de la production primaire), et produisent des particules de plus petite taille (Eppley & Peterson, 1979 ; McCave, 1984 ; Lallier-Vergès & Alberic, 1990 ; Libes, 1992 ; Alldredge, 1998).

La matière organique morte et le matériel excrété par le zooplancton transitent rapidement dans la colonne d'eau sous l'effet du poids, et sont dès le début de leur parcours littéralement « attaqués » par des bactéries hétérotrophes et autres organismes détritivores qui reminéralisent une part importante des composés organiques. Suess (1980) a montré que la cinétique de dégradation de la MO pendant la sédimentation est telle que la majeure partie de la reminéralisation se fait dans les premiers 1000 mètres de profondeur. Romankevich (1984) a estimé pour l'océan global que de 5 à 14 % du carbone organique océanique arrive à l'interface sédiment/eau et que de 92 à 97% de cette proportion est reminéralisée, soit un coefficient moyen de fossilisation de 0,4%. Le flux de MO décroît exponentiellement avec l'augmentation de la colonne d'eau (Martin *et al.*, 1987), et les flux estimés de carbone organique diminuent rapidement (respectivement à 200, 1000 et 5000 mètres ils correspondent à 10%, 3% et 1% de la productivité primaire) (Berger *et al.*, 1989).



**Figure II-7 :** Teneurs en carbone organique total (%) dans la couche superficielle des sédiments marins (< 5 cm) (Seiter *et al.*, 2004).

Les flux organiques qui atteignent de grandes profondeurs dépendent fortement de la quantité de particules minérales (tests siliceux et carbonatés ou argiles détritiques) qui ont participé à la capture de la MO (Armstrong *et al.*, 2002 in Pichevin, 2004). Ainsi, des particules organiques cloisonnées dans des enveloppes minérales ou associées à la structure cristalline des argiles ont plus de chance d'échapper à la dégradation que les particules libres. Probablement que le rôle d'agent protecteur, par enveloppement, des minéraux, contribue de façon synergique à la réduction du temps de chute, par augmentation du poids.

Un autre facteur important est la vitesse de transport horizontal lié aux courants, une composante supplémentaire qui peut s'ajouter au transport vertical des particules, et qui prend en compte la taille, le poids et la forme des particules. Ainsi, plus le temps de résidence de la MO dans la masse d'eau est long, plus sa dégradation sera approfondie et plus médiocres seront sa quantité et sa qualité à l'endroit final de dépôt. Ce transport latéral peut être aussi responsable de la dilution de la productivité par l'écart qu'il introduit entre les centres de production en surface et le centre de

déposition sur le fond. Des phénomènes d'advection déterminent aussi l'existence de zones préférentielles de dépôt et de zones de non dépôt.

Les variations du niveau de la mer jouent aussi, de manière non négligeable, sur le transport des particules dans la colonne d'eau. Ceci se passe toutefois à l'échelle des cycles climatiques, car l'eustatisme influe sur l'accumulation organique dans les sédiments, conditionnant d'une part la productivité proprement dite, et agissant d'autre part sur les mécanismes de transport et de dépôt, via les contraintes physiques des courants, où une variation d'intensité peut déplacer le centre d'apport de nutriments ou le centre de dépôt, voire l'éroder, ou peut maintenir les particules en suspension pour une plus ou moins longue période. La morphologie de la marge détermine l'impact des variations du niveau marin sur les systèmes d'*upwellings* qui y sont établis. Les plateformes continentales plates et larges sont ainsi caractérisées par une faible perte des particules fines au profit des talus, ce qui n'est pas le cas des plateformes étroites et pentues (Harris & Wiberg, 2002). Ces effets sont le plus souvent ressentis à l'échelle du globe et sont considérés comme un paramètre de contrôle global de la sédimentation.

Après avoir franchi l'interface entre la colonne d'eau et les sédiments, la MO subit l'ensemble des mécanismes et réactions physiques, biologiques, et chimiques, qui transforment les sédiments superficiels : la diagénèse. Ces processus déterminent la quantité et la qualité de la matière organique dans les premières centaines de mètres de sédiments (Berner, 1980). La consommation de la MO sédimentaire initie une série de réactions d'oxydo-réduction catalysées par les micro-organismes benthiques. Les réactions dites diagénétiques attaquent d'abord la MO dissoute, plus fragile, et ensuite la matière particulaire, plus complexe. Ne sont alors préservés que quelques rares débris réfractaires de MO (Lallier-Vergès & Albéric, 1990).

Dans des environnements sédimentaires riches en oxygène, la MO est dégradée par des bactéries aérobies qui utilisent l'oxygène comme accepteur d'électron. Ce processus d'oxydation est la réaction la plus rentable en termes thermodynamiques (Canfield, 1993). En cas d'absence d'oxygène, d'autres éléments chimiques, présents dans les composés azotés (ammonium, nitrite, et nitrate), des oxydes et hydroxydes de fer ou de manganèse, ou dans des composés sulfatés, le remplacent en tant



qu'accepteur d'électrons. Les organismes qui réalisent ces réactions alternatives, des bactéries anaérobies, suivent une logique de rentabilité énergétique : dans l'ordre, de la réaction la moins coûteuse à la plus coûteuse en énergie, on trouve ainsi la nitrification, la dénitrification, la sulfato-réduction ; la fermentation ; la méthanogénèse.

La respiration des organismes soumis à l'oxydation de la matière organique consomme l'oxygène libre de l'environnement. Selon la quantité d'organismes et la quantité de MO présents, les teneurs en oxygène disponible peuvent chuter de façon importante, amenant à des conditions dysoxiques, voir complètement anoxiques. C'est le cas des sédiments : la consommation d'oxygène le plus souvent très rapide produit des conditions dysoxiques dès les premiers millimètres, ce fait peut cependant être modulé par les eaux qui surplombent le fond. Des eaux de fond oxygénées entretiennent en effet une couche superficielle oxydante de sédiments, et l'oxygène par diffusion peut pénétrer plus ou moins profondément les sédiments dépendant de sa nature. La bioturbation peut, dans ces conditions, magnifier cette pénétration et amplifier la dégradation de la MO, car la macrofaune vivant dans la tranche avec disponibilité d'oxygène, remobilise partiellement le sédiment pendant ses déplacements, l'homogénéisant ainsi mécaniquement. Dans l'autre cas de figure, celui des eaux de fond dysoxiques/anoxiques, la bioturbation est inhibée ou inexistante, favorisant la préservation de la MO et créant par conséquent des laminations qui reflètent les variations de flux de matière (saisonniers, si les taux de sédimentation sont assez importantes) au sein de la colonne sédimentaire.

L'importance de l'anoxie pour la préservation de la MO sédimentaire partage la communauté scientifique, entre ceux qui la perçoivent comme un mécanisme majeur de préservation (Demaison & Moore, 1980 ; Heinrichs & Reeburg, 1987 ; Candfield, 1989 ; Ingall *et al.*, 1993), et ceux qui ne la considèrent pas aussi déterminante (Calvert & Pedersen, 1992 ; Bertrand & Lallier-Vergès, 1993 ; Bertrand *et al.*, 1994 ; Lallier-Vergès *et al.*, 1995 ; Disnar & Ramanampisoa, 1995 ; Boussafir *et al.*, 1995 ; Ganeshram *et al.*, 1999), et avancent d'autres types de contrôle, comme la productivité en surface, les flux vers les sédiments, la granulométrie de ce dernier, etc. Une bonne compilation sur ce sujet est présentée par Pichevin (2004).

### III – Méthodologie

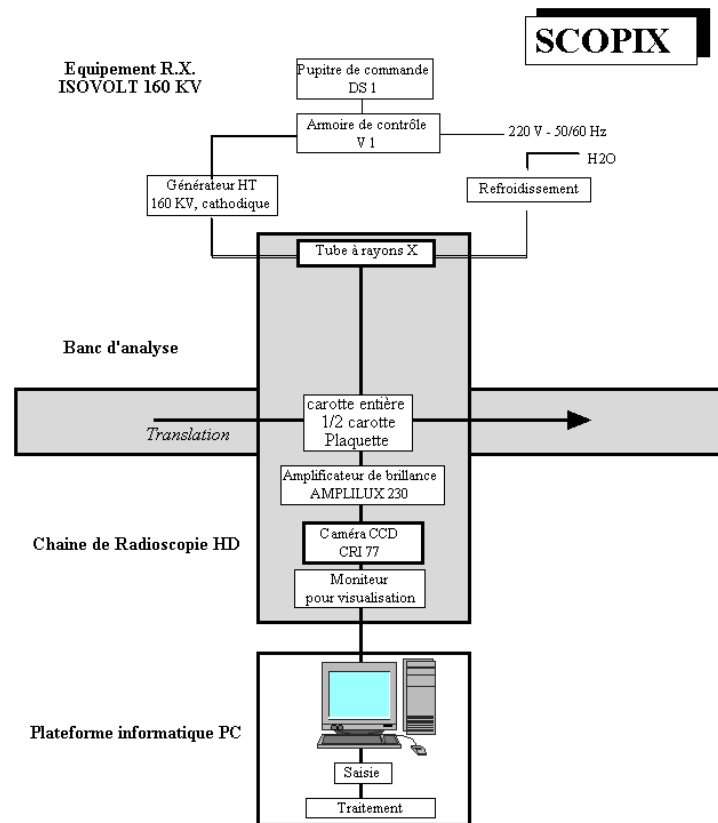
Ce travail a porté sur l'étude de l'évolution de la sédimentation organique de deux régions situées respectivement sur les côtes occidentale et orientale de l'Amérique du Sud, au cours de l'Holocène. Il a été abordé par l'étude sédimentologique (SCOPIX, teneur en eau et densité), pétrographique (palynofaciès), géochimique élémentaire (COT, NT, ST, C:N, Indice d'Hydrogène, Indice d'Oxygène), et moléculaire (n-alcanes et alcénones) de sédiments océaniques. Afin d'interpréter ces marqueurs en tant que paramètres paléo-environnementaux et paléo-climatiques, le cadre chronologique a été obtenu sur la base de datations radiocarbone réalisées sur la matière organique par AMS (« *accelerator mass spectrometry* ») et calibrées grâce aux courbes de variations temporelles du  $^{14}\text{C}$ . Des comparaisons entre les deux régions étudiées ont été établies pour mieux étayer la variabilité climatique de part et d'autre de l'Amérique du Sud, leur interconnexion et leur impact respectif sur les écosystèmes.

### ***III.1. Lithologie***

#### **III.1.1. L'imagerie radiographique**

Du point de vue sédimentologique, l'emploi de techniques d'imagerie faisant usage des rayons X a prouvé son efficacité et son applicabilité dans le domaine des propriétés physiques des sédiments : densité, hétérogénéité, granulométrie, minéralogie, macrostructures, etc. (Lofi & Weber, 2001). Un autre point fort de cette application vient du fait qu'il s'agit d'une technique non invasive et non destructive, avec des possibilités de visualisation qui couvre à la fois les détails et l'ensemble des séries étudiées. Ceci présente de grands avantages pour le choix de l'échantillonnage. Les récents développements techniques ont permis une augmentation exponentielle de la résolution et la digitalisation des résultats, dont résulte un raffinement de la connaissance des processus environnementaux et des possibilités accrues d'application à des séries naturelles portant des structurations fines et délicates, comme les sédiments laminés lacustres ou marins. L'avantage de la digitalisation de la méthodologie est particulièrement net concernant le développement des techniques d'analyses d'images.

La radioscopie « SCOPIX » est une technique numérique d'imagerie qui utilise une source de rayons X associée à un amplificateur de haute définition et une caméra CDD (figure III-1). Les résultats issus de cette analyse sont donnés sous forme de fichiers numériques en niveaux de gris (16 bits, 4096-8192 tons de gris) proportionnels à la composition et aux densités des objets radiographiés. Les données obtenues sont des profils en niveaux de gris, qui permettent de définir les faciès lithologiques, les structures sédimentaires, les zones de bioturbations liées aux activités biologiques, et ainsi appuyer et améliorer la description visuelle (Migeon *et al.*, 1999).



**Figure III-1:** Schéma de la chaîne d'acquisition de l'analyseur SCOPIX (d'après Migeon *et al.*, 1999).

Immédiatement après l'ouverture, la carotte est photographiée à l'aide d'un appareil photo numérique, puis une plaquette de  $\sim 1$  cm d'épaisseur sur 10 cm de large est sous-échantillonnée le long de la section de la carotte et placée dans une enceinte de protection plombée pour analyse. Un rayonnement X issu d'un tube dont la puissance et l'intensité sont modulables (maximum 160 KV - 19 mA), traverse l'échantillon déplacé latéralement sur un chariot motorisé (figure III-1). Les images sont récupérées et traitées sur une plateforme informatique PC grâce à des modules spécifiques conçus par la société GRAFTEK. Cette méthode a été, pour notre thèse, mise en œuvre au laboratoire de sédimentologie de l'UMR EPOC (5805 CNRS) à Bordeaux, en collaboration étroite avec Michel CREMER et Joël SAINT-PAUL.

### III.1.2. Teneur en eau et densité

#### \* Teneur en eau :

Il s'agit de déterminer la proportion pondérale de l'eau contenue dans un échantillon de sédiment. L'essai consiste à déterminer la masse  $\omega_{\text{eau}}$  de l'eau contenue dans un échantillon de sédiment en pesant le sédiment humide en l'état, puis après l'avoir séché dans une étuve à 40°C durant une semaine pour éliminer toute l'eau. On obtient alors  $M_{\text{sec}}$  du sédiment sec. L'estimation de la teneur en eau a été calculée selon l'équation suivante :

$$\omega = [(M_{\text{humide}} - M_{\text{sec}}) * 100] * M_{\text{humide}}^{-1}$$

où  $\omega$  est la teneur en eau  
et M la masse totale,  
de l'échantillon.

#### \* Densité réelle

Pour la densité réelle, il s'agit de déterminer le poids spécifique réel d'un volume de sédiment prélevé. Le volume est estimé immédiatement lors de l'échantillonnage de la carotte grâce à un récipient dont le volume est connu au préalable, alors que le poids est évalué au laboratoire après séchage et pesée. La connaissance de ces deux variables permet de calculer la densité apparente selon la relation :

$$\delta_a = P * V^{-1}$$

où P est le poids sec de l'échantillon  
et V le volume total du récipient.

## ***III.2. Contrôle chronologique***

### **III.2.1. Datations**

La chronologie utilisée dans le cadre de cette thèse a été basée sur la réalisation de datations  $^{14}\text{C}$  AMS (« Accelerator Mass Spectrometry »). Les analyses AMS ont été menées sur la matière organique sédimentaire totale au Laboratoire de mesures du Carbone 14 – L.M.C.14 (Saclay / Gif-sur-Yvette). Les prétraitements ont été précédés d'une observation à la loupe binoculaire afin d'éliminer d'éventuels contaminants (poils, fibres, radicelles...). En présence d'un matériel très hétérogène, des micro-prélèvements de fractions organiques homogènes ont été effectués et plus spécifiquement sur des fractions syn-sédimentaires. Pour isoler la matière organique à des fins de datations, le sédiment a subi un traitement acide, base, acide pour éliminer les carbonates:

**HCl 0.5 N** - décarbonatation à chaud, environ 80°C pendant 1 heure, suivie par un rinçage à l'eau distillée jusqu'à pH neutre ;

**NaOH 0.1 N** - à 80°C pendant 1 heure pour éliminer les acides humiques et fulviques. Rinçage à l'eau distillée jusqu'à pH neutre ; et,

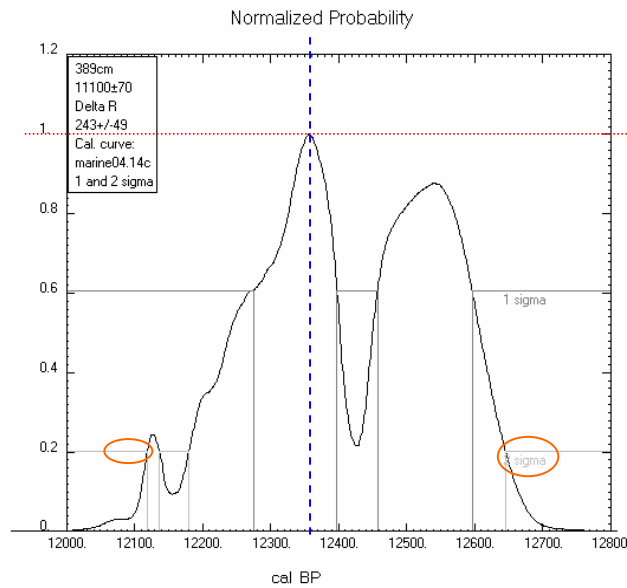
**HCl 0.5 N** - pendant 1 heure – élimination du  $\text{CO}_2$  atmosphérique moderne qui aurait pu être absorbé par l'échantillon lors de son traitement basique, puis rinçage à l'eau ultra pure jusqu'à l'obtention d'un pH neutre.

L'échantillon est séché dans une étuve à vide, puis brûlé en présence d'environ 500 mg d'oxyde de cuivre et d'un fil d'argent pendant 4 heures à 900°C. Le  $\text{CO}_2$  obtenu est ensuite réduit par  $\text{H}_2$  en présence de poudre de fer à 600°C. La quantité de fer est égale à 3 fois la quantité de carbone. Le carbone se dépose sur la poudre de fer et l'ensemble est ensuite pressé dans une cible. Il s'est avéré nécessaire de purifier certains échantillons au Sulfix pour pouvoir les graphiter.

L'activité en  $^{14}\text{C}$  de l'échantillon est calculée en comparant les intensités mesurées séquentiellement des faisceaux de  $^{14}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$  et  $^{12}\text{C}$  de chaque échantillon avec ceux de standards de  $\text{CO}_2$  préparés à partir de l'acide oxalique de référence HOxI. Elle est exprimée en pMC (« *percent of modern carbon* ») normalisé à un  $\delta^{13}\text{C}$  de -25 pour mille. Les âges radiocarbone sont calculés selon Mook et Van der Plicht (1999) en corrigeant le fractionnement avec le  $\delta^{13}\text{C}$  calculé à partir de la mesure du rapport  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  sur Artemis. Ce  $\delta^{13}\text{C}$  inclut le fractionnement survenant aussi bien pendant la préparation des échantillons que pendant la mesure SMA. Il ne peut donc pas être comparé au  $\delta^{13}\text{C}$  mesuré sur un spectromètre de masse. L'erreur sur la mesure tient compte à la fois de l'erreur statistique, de la variabilité des résultats et du blanc soustrait au résultat.

Pour le calcul de l'âge calibré, nous avons pris en compte également les effets réservoirs qui peuvent être plus ou moins importants en fonction des régions. Une normalisation et une calibration des âges  $^{14}\text{C}$  ont été réalisées à l'aide du logiciel CALIB© (Stuiver & Reimer, 1993 - version 5.01 ; base de données de calibration de Hughen *et al.*, 2004 *in* <http://calib.qub.ac.uk/>) pour établir des modèles chronologiques spécifiques à chaque zone étudiée, afin d'aboutir à des comparaisons plus fiables.

La détermination de l'âge calibré a été basée sur la méthode de maximum de probabilité de l'intervalle de calibration. L'âge ainsi déterminé, noté âge cal BP, correspond au point de probabilité maximale de l'intervalle à 95,4% de confiance ( $\pm 2$  sigma) (figure III-2). Les âges ont été rapportés selon les consignes données par Stuiver & Reimer *in* <http://calib.qub.ac.uk/calib/manual/chapter4.html> (dernière actualisation le 02/08/2005) : les âges ont été arrondis à la décennie près pour les datations dont l'écart-type est supérieur à 50 ans et à la mi-décennie quand l'écart-type était inférieur à cette valeur.



**Figure II-2 :** Exemple de détermination de l'âge cal BP sur un échantillon présentant une distribution complexe de la probabilité de l'âge calibré. Probabilités calculées par rapport à la courbe de calibration marine.

### III.2.2. Modèle chronologique

Le modèle chronologique employé utilise une fonction d'interpolation polynomiale cubique - « *cubic spline* », écrite en « *Visual Basic* » sur une feuille de calcul Excel, disponible sur le site internet <http://www.srs1software.com/download.htm#spline>. Les « *splines* » sont utilisées pour approcher des contours complexes liés aux problèmes d'interpolation. La méthode des « *splines* » est souvent préférée à l'interpolation polynomiale, car on obtient grâce à cette méthode des résultats similaires en se servant de polynômes ayant des degrés inférieurs. La profondeur utilisée pour déterminer l'âge de chaque échantillon, est l'épaisseur moyenne de la tranche échantillonnée.

À partir du modèle chronologique construit, la résolution temporelle de chaque échantillon et les taux de sédimentation ont été estimés grâce aux équations suivantes :

$$\text{Résolution}_{\text{temporelle}} = [(\text{âge à } X_{+1} \text{ cm}) - (\text{âge à } X \text{ cm})] * [(X_{+1} \text{ cm} - X \text{ cm})]^{-1}.$$

$$\text{Taux}_{\text{sédimentation}} = [(X_{+1} \text{ cm} - X \text{ cm})] * [(\text{âge à } X_{+1}) - (\text{âge à } X)]^{-1}.$$



### ***III.3. Caractérisation de la fraction organique***

En ce qui concerne l'étude de la matière organique et par souci d'une meilleure interprétation des données géochimiques, toutes les analyses géochimiques ont été appuyées par des observations pétrographiques.

#### **III.3.1 Les observations pétrographiques**

L'isolement de la fraction organique après élimination de la fraction minérale, et sa concentration, permet une meilleure lecture des informations sur ses origines et son état de préservation. Ce résultat ne pourrait que difficilement être obtenu par observation directe de la matière organique sur une lame mince, par exemple. Selon Baudin *et al.* (2007), l'analyse des palynofaciès tente d'intégrer tous les aspects de l'assemblage organique : origine des particules, estimation de leur quantité et de leurs proportions relatives, de leur taille et de leur préservation ou dégradation.

Le principe de la pétrographie organique repose sur l'inspection visuelle des caractéristiques des résidus organiques résistants rencontrés dans les sédiments. Cet examen peut apporter des renseignements importants sur l'origine et les processus qu'a subis la matière organique (MO), car les caractéristiques de la MO réfractaire ont été héritées de la MO originelle ou alors acquises par le résultat de la dégradation microbienne. En effet, la conséquence de cette médiation microbienne sur la MO est la forte dégradation de sa fraction métabolisable, néanmoins l'ensemble des résidus réfractaires ayant survécu à cette attaque microbienne gardent la trace des processus subis ainsi que de ses origines. L'importance de la pétrographie organique est donc d'autant plus grande pour la confirmation et le raffinement d'autres données géochimiques, analysées en parallèle.

Les études pétrographiques sur diverses séries sédimentaires ont conduit à la reconnaissance de trois grands groupes de constituants organiques. Ces groupes sont le

reflet de l'origine, de la préservation et du mode de transport des particules : le groupe **autochtone**, ou « aquatique », dont les particules sont produites au sein de la colonne d'eau et principalement composés d'une matière amorphe, de débris algaires et zooclastes ; le groupe **allochtone**, ou « terrestre », représenté par une grande variété de débris ligno-cellulosiques et de matériel pédogénétique (sols) ; et le troisième groupe, composé de spores, de pollens et de débris d'incendies forestiers, apportés en général par voie éolienne.

L'analyse des palynofaciès, classiquement employée pour l'étude de séries anciennes et lacustres, riches en matière organique, est depuis un certains temps également appliquée aux sédiments marins (Bertrand *et al.* 1990 ; Lallier-Vergès *et al.* 1991, 1993, 1998 ; Littke *et al.*, 1994 ; Boussafir & Lallier-Vergès, 1997 ; Lukge *et al.*, 1999 ; Valdés *et al.*, 2004).

Les observations pétrographiques (palynofaciès) ont été réalisées à l'échelle microscopique. À cette échelle, il est possible d'identifier et de semi-quantifier les différents constituants figurés et amorphes, en fonction de leur origine et de leur état de préservation. Cette quantification aboutit au calcul des apports (marin/terrestre), ce qui permet d'estimer, le long de la colonne sédimentaire, la productivité ainsi que les influences d'origine terrestre. Cette méthode consiste à broyer un échantillon afin d'avoir une granulométrie d'environ 250 µm. Les attaques par l'acide chlorhydrique (37%), puis par l'acide fluorhydrique (48%), et enfin à nouveau par l'acide chlorhydrique (50%), ont pour objectif d'éliminer successivement les carbonates, la silice et les fluorosilicates précédemment formés. On obtient ainsi un concentré organique qui servira à monter une lame totale. Ce concentré est ensuite observable au microscope en lumière transmise.

Les observations et les comptages des différentes fractions du palynofaciès ont été effectués sur microscope photonique optique, sous objectif 50x en immersion d'huile, en lumière naturelle transmise, et en tenant compte de leur surface à l'aide d'une grille micrométrique. Les pourcentages surfaciques relatifs de chaque classe palynologique ont été calculés en utilisant une fonction macro du logiciel Excel® développée par l'Institut des Sciences de la Terre d'Orléans. Cette macro, prévue

initialement pour des sédiments lacustres, permet d'estimer, par une méthode statistique, le seuil auquel les pourcentages de chaque composant ne varient plus, quels que soient les comptages additionnels effectués, afin d'obtenir une valeur statistiquement juste.

Cette macro s'applique pour un palynofaciès hétérogène constitué de plusieurs constituants en proportions équilibrées, ce qui n'est pas le cas des sédiments organiques marins pour lesquels les palynofaciès sont constitués essentiellement de matière organique amorphe (gélifiée ou grumeleuse), les quelques pourcents restants étant composés de débris ligno-cellulosiques, de parois d'algue et quelques framboïdes ou cristaux de pyrite. Ce déséquilibre ne permet pas d'atteindre statistiquement un palier correspondant à une stabilisation des différences entre les pourcentages des différents constituants. Nous avons donc, pour chaque lame, réalisé un comptage de 20 plages correspondant à environ 700 et 800 particules. Le déplacement de la lame a été fait d'une façon régulière afin de respecter un comptage aléatoire.

Des observations complémentaires ont été réalisées au plus fort grossissement (100x) ainsi qu'en lumière réfléchie pour une meilleure identification de la pyrite et de l'état d'oxydation des débris ligno-cellulosiques, et en fluorescence pour l'identification des parois d'algues et des dinoflagellés.

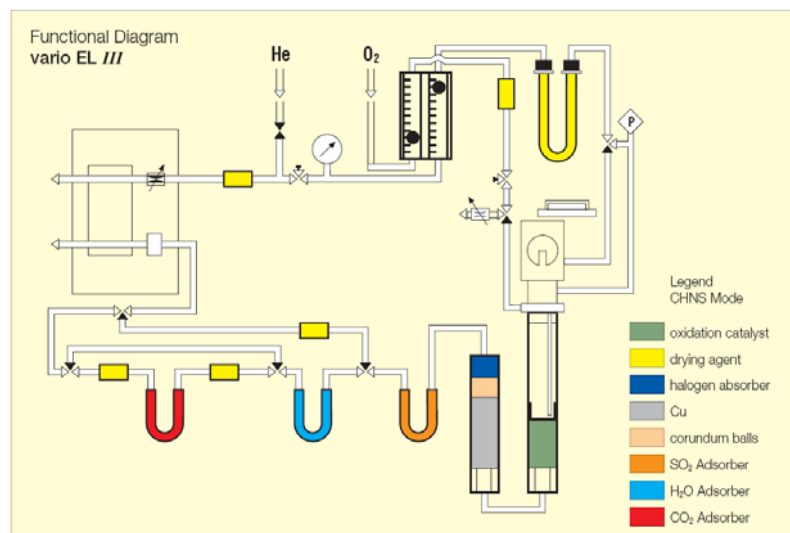
#### III.3.2 Analyses géochimiques élémentaires

Le rapport C:N, déterminé à partir des analyses élémentaires, est largement employé pour la distinction entre les sources algaires et celles issues de végétaux supérieurs de la matière organique sédimentaire (MOS). Une bonne compilation sur ce sujet a été réalisée par Meyers (1997). Le rapport C:N des algues varie typiquement entre 4 et 10, tandis que des rapports de l'ordre de 20 et plus sont communs pour les plantes terrestres. La base de cette discrimination repose sur deux facteurs : (1) l'absence de cellulose dans les algues (C bas), qui contraste avec son abondance dans les plantes vasculaires (C élevé), et (2) la richesse en protéines des algues (N élevé).

Non seulement la diagenèse peut influencer le C:N de la MOS, par dégradation sélective, mais aussi sa granulométrie et sa minéralogie (Tyson 1995, Baudin *et al.* 2007). Ce rapport doit donc être employé avec précaution, mais le C:N se préserve suffisamment bien dans les environnements sub-aquatiques pour que les informations sur les sources soient identifiables, surtout en combinaison avec d'autres marqueurs.

Le dosage total du carbone (CT), de l'azote (NT) et du soufre (ST) a été réalisé à l'analyseur élémentaire « Elementar, modèle Vario El III » au Laboratoire de géochimie organique de l'UR 055 – IRD à Bondy.

Le principe de ces analyses est basé sur une combustion catalytique à haute température, d'où l'utilisation de capsules en étain, qui permettent une combustion éclair à une température allant jusqu'à 1800°C. Les gaz ainsi libérés (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> et SO<sub>3</sub>, etc), sont en partie retardés par des pièges spécifiques au CO<sub>2</sub>, au SO<sub>2</sub> et à l'H<sub>2</sub>O, et mesurés par un détecteur à thermo conductivité (TCD) afin d'éviter toute interférence (figure III-3).



**Figure III-3 :** Principe de fonctionnement de l'analyseur élémentaire « Elementar - Vario El III ».

Source : ([http://www.elementar.de/cms/vario\\_el.html?&L=2](http://www.elementar.de/cms/vario_el.html?&L=2)).

Le WO<sub>3</sub> (trioxyde de tungstène), dans le tube de combustion, agit comme un catalyseur afin de piéger les alcalins (lithium, sodium, potassium...) et les alcalino-terreux (métaux issus du calcium, du strontium, du baryum et du radium), qui s'oxydent facilement, et d'empêcher la formation de sulfates non volatils. Pour éviter la formation de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (acide sulfurique) à partir du SO<sub>2</sub> et de H<sub>2</sub>O, ainsi que la condensation de la vapeur d'eau, tous les tubes en contact avec les gaz sont chauffés.

Les NO<sub>x</sub> libérés lors de cette oxydation sont réduits en N<sub>2</sub> et directement envoyés vers le TCD, et comparés au gaz vecteur (hélium) : la différence ainsi calculée est proportionnelle à la teneur élémentaire en azote. Les composés soufrés sous forme de SO<sub>3</sub> sont réduits sur du cuivre afin de pouvoir être concentrés sur le piège spécifique sous forme de SO<sub>2</sub>. L'excès d'oxygène est aussi piégé sur du cuivre. Les halogènes volatils sont piégés sur de la laine d'argent placée à la sortie du tube à réduction. La présence d'oxygène, nécessaire pour assurer une combustion totale, est gérée par des indices de dosage correspondant à une durée d'oxygène.

### III.3.3. Analyses géochimiques par pyrolyse

#### Rock-Eval 6®

La technique de pyrolyse Rock-Eval a été initialement développée pour répondre aux besoins de l'exploration pétrolière (Espitalié *et al.*, 1985 ; Lafargue *et al.*, 1998). Elle consiste en un craquage thermique de la matière organique puis en une quantification des composés qui ont été volatilisés lors de ce craquage. De nombreux paramètres sont dérivés de cette technique, mais pour cette étude nous nous intéressons à ceux qui peuvent être utilisés pour la caractérisation des sources et de l'état de matière organique sédimentaire. Ces paramètres sont le pic S<sub>2</sub>, le carbone organique total (COT), l'indice d'hydrogène (IH) et l'indice d'oxygène (IO), dont les caractéristiques sont présentées après la description de la méthode.

Dans un premier temps, un échantillon sec et broyé est introduit dans un four à pyrolyse, sous atmosphère inerte ( $N_2$ ). Il est soumis à des températures croissantes de 200 à 650°C à gradient constant de 30°C\*min<sup>-1</sup>. Durant cette phase, les effluents hydrocarbonés produits sont détectés et quantifiés en continu par un détecteur à ionisation de flamme (FID) et les CO et CO<sub>2</sub> produits sont détectés par deux cellules infrarouges. L'échantillon est ensuite repris et introduit dans un four à oxydation sous air purifié, puis soumis à une augmentation de température de 400 à 750°C à gradient constant de 30°C\*min<sup>-1</sup>. Le CO et le CO<sub>2</sub> qui sont émis par la matière organique en s'oxydant, sont alors détectés en continu, par des cellules infrarouges. La méthode basique conçue pour l'analyse des roches anciennes par a été adaptée pour les sédiments récents non consolidés. Les principales modifications consistent en la réduction des températures initiales de pyrolyse, des températures finales d'oxydation, ainsi que des gradients de température (Tableau III-1), ceci dans le but de mieux prendre en compte la matière organique récente, plus labile et moins dégradée, de minimiser l'interférence par les carbonates, et d'accélérer les analyses.

**Tableau III-1 :**

Méthode	Cycle	Température initiale (°C)	Température finale (°C)	Gradient (°C*min. <sup>-1</sup> )
<b>Basic</b>	Pyrolyse	300	650	25
	Oxydation	300	850	20
<b>Recentism</b>	Pyrolyse	200	650	30
	Oxydation	400	750	30

Enfin, l'intégration de ces courbes, mesurées lors de l'émission d'effluents de pyrolyse et d'oxydation, permet de quantifier le carbone organique total de l'échantillon étudié, ainsi que les proportions de constituants hydrocarbonés et oxygénés que comprend initialement la matière organique qu'il renferme (Figure III-4). Les paramètres utilisés pour ces calculs sont décrits ci-dessous, d'après Behar *et al.* (2001) : 1, 2 et 3 sont des paramètres basiques mesurés, et A, B et C des paramètres secondaires dont le calcul dépend des paramètres basiques.

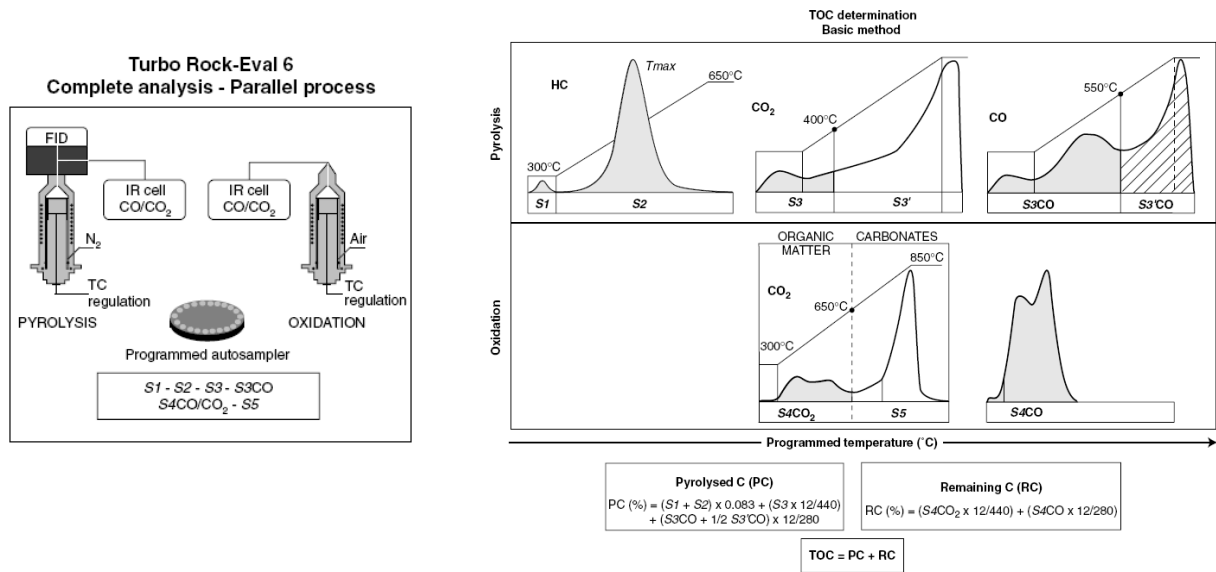
- 1) **S1** et **S2** : Ces paramètres basiques correspondent à la quantité de composés hydrocarbonés produits pendant le cycle de pyrolyse, respectivement avant et après 300°C (figure III.4). Ils sont exprimés en  $\text{mg HC} \cdot \text{g}^{-1}$  échantillon. Le **S1**, qui correspond aux hydrocarbures initialement libres dans les échantillons, n'a d'intérêt marqué que pour l'analyse de potentiel des roches-mères pétrolières ou pour l'étude de la pollution (Lafargue *et al.*, 1998). Le **S2** représente les hydrocarbures libérés par le craquage thermique ;

*\* HC - Hydrocarbures*

- 2) la famille **S3** (**S3**, **S3'**, **S3CO**, et **S3'CO**) : ces paramètres correspondent aux émanations de dioxyde de carbone (**S3** et **S3'**) et de monoxyde de carbone (**S3CO**, et **S3'CO**) pendant le cycle de pyrolyse. Le **S3** correspond au  $\text{CO}_2$  libéré entre le début de la pyrolyse et le seuil de 400°C (températures similaires à celles du **S1**) dont l'origine est supposée organique, tandis que le **S3'** correspond au  $\text{CO}_2$  libéré à des températures au-delà de 400°C, dont l'origine est associée à la fraction minérale (figure III-4). Le partage entre le **S3CO** et le **S3'CO** est différent, le seuil de température est mobile. Le premier pic après le début de l'analyse correspond au **S3CO**, généralement entre 450 et 600°C (en cas d'absence de minimum intermédiaire de CO, une limite est imposée à 550°C). Le **S3'CO** correspond au CO produit entre le minimum intermédiaire et la fin des mesures. Selon Lafargue *et al.* (1998), la borne supérieure d'intégration du **S3CO** est fixée pour éviter la réaction de Boudouard ( $\text{C} + \text{CO}_2 = 2\text{CO}$ ) qui intervient au-delà de cette température (figure III.4). Ainsi, le **S3CO** reflète la matière organique et le **S3'CO** est lié à la réactivité du  $\text{CO}_2$  libéré par la décomposition thermique des carbonates. Ils sont exprimés respectivement en  $\text{mg CO}_2 \cdot \text{g}^{-1}$  échantillon<sup>-1</sup> et en  $\text{mg CO} \cdot \text{g}^{-1}$  échantillon<sup>-1</sup> ;

- 3) **S4CO**, **S4CO2** et **S5** : ils sont mesurés pendant le cycle d'oxydation et correspondent aux quantités de CO et de  $\text{CO}_2$  libérées. Le CO mesuré du

début à la fin de l'analyse correspond au **S4CO** (figure III-4), qui est supposé être d'origine organique. Le **S4CO2** est mesuré de la même manière que le S3CO, le seuil supérieur mobile est généralement situé entre 550 et 720°C et le CO<sub>2</sub> produit au-delà de ce seuil correspond au **S5** (figure III-4). De même, le premier est supposé d'origine organique, et le dernier d'origine minérale.



**Figure III-4** : Principes de mesure et de calcul des paramètres de l'analyseur Rock-Eval 6®

Source : Behar *et al.*, (2001).

- A) le Carbone Organique Total (**COT**), exprimé en pourcentage, indique la quantité totale de la matière organique contenue dans l'échantillon. Il correspond à la somme du carbone pyrolysé (CP) et du carbone résiduel (CR) (figure III.2-4);
- B) L'indice d'hydrogène (**IH**), exprimé en mg HC \*g COT<sup>-1</sup> : il exprime la proportion d'effluents hydrocarbonés émis durant la pyrolyse (S2) normalisé par le COT, soit : **IH** = S2\*100\*COT<sup>-1</sup>. Il correspond à la fraction de la matière organique émise sous forme de composés hydrocarbonés volatils.



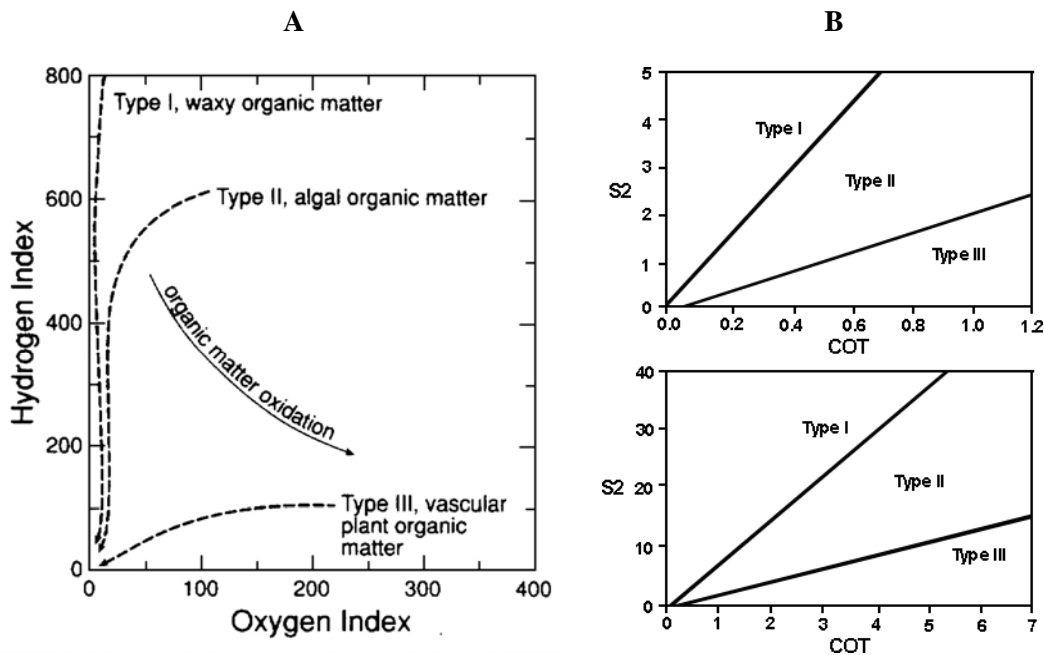
En d'autres termes, il exprime la richesse en hydrogène de la matière organique et est proportionnel au rapport H:C de la matière sédimentaire ;

- C) L'indice d'oxygène (**IO**), exprimé en  $\text{mg CO}_2 \cdot \text{g COT}^{-1}$  : il correspond au degré d'oxydation de la matière organique. Il exprime la richesse en oxygène de cette dernière et est calculé en rapportant les teneurs d'effluents oxygénés (CO et/ou CO<sub>2</sub>) normalisés par le COT (Lafargue *et al.*, 1998), soit  $\text{IO} = \text{S3} \cdot 100 \cdot \text{COT}^{-1}$  ou  $\text{IOCO} = \text{S3CO} \cdot 100 \cdot \text{COT}^{-1}$ . Comme l'IH pour le rapport H:C, l'IO est proportionnel au rapport O:C de la matière sédimentaire. Le Rock-Eval 6 propose aussi l'indice réel d'oxygène **IORE6**, qui est la quantité d'oxygène provenant de la matière organique (oxygène du S3CO et du S3CO<sub>2</sub>), ramenée au COT, soit  $\text{IORE6} = \text{IO} \cdot (32/44) + \text{IOCO} \cdot (16/28)$ , exprimé en  $\text{mg O}_2 \text{ gTOC}^{-1}$ .

La réduction de la température finale pourrait affecter seulement le calcul du carbone minéral. Ce paramètre peut être substitué par le simple calcul de la différence entre le carbone total, mesuré par l'analyse élémentaire, et le carbone organique total, mesuré avec le Rock-Eval.

La représentation graphique de l'IH *versus* l'IO est proportionnelle à la représentation graphique des rapports élémentaires H:C et O:C de la matière organique et des charbons décrite par Van Krevelen (Espitalié *et al.*, 1977, Tyson 1995). Dans cette représentation, il est possible d'identifier trois types de matières organiques et leur route d'altération diagénétique (Figure III-5 A) : le **Type I**, spécialement riche en hydrocarbures, est originaire d'une biomasse microbienne ou des cires/résines de plantes terrestres. Le **Type II** dont la teneur en hydrocarbures est modérée, a pour origine des algues. Enfin le **Type III**, pauvre en hydrocarbures mais riche en composés oxygénés, est à rapporter au matériel ligneux des plantes. La dégradation de la matière organique (MO) affecte autant l'IO que l'IH. La MO riche en composés hydrocarbonés (types I et II) voit sa teneur en hydrogène diminuer pendant l'oxydation, tandis que la teneur en oxygène augmente, prenant ainsi des

caractéristiques d'une MO de type III. D'après Tyson (1995), Dahl *et al.* (2004), Yalçın Erik *et al.* (2006), et Inthorn *et al.* (2006), l'examen du diagramme S2 *versus* COT (figure III-5 B) peut apporter une amélioration significative dans la différenciation des types de MO.



**Figure III-5 :** Typologie de la matière organique sédimentaire d'après les paramètres Rock-Eval

**Sources :** diagramme IH x IO - Meyers (1997) ; diagramme S2 x COT - Tyson (1995).

### III.3.4. Analyses géochimiques moléculaires

Les caractéristiques globales (C, N, S, C:N, IH, IO, etc.) des sédiments sont importantes pour identifier les origines de la matière organique sédimentaire (MOS), mais ce sont les constituants moléculaires qui donnent des détails sur la production, le transport et la préservation de cette MOS (Meyers, 1997). La fraction extractible aux solvants organiques, les géolipides (Meyers & Ishwatari *in* Engel & Macko, 1993), est fonction des sources organiques et des transformations diagénétiques avant et après la

sédimentation de la MO. Certains de ces géolipides plus résistants que d'autres à la diagenèse sont d'une grande utilité dans la détermination de l'origine et des conditions de transport et de préservation de la matière organique, comme les n-alcanes.

Les termes fossile chimique, marqueur biologique, biomarqueur, stratigraphie moléculaire, paléoclimatologie moléculaire (Brassell *et al.* 1986 ; Ohkouchi *et al.*, 1997), marquent bien l'intérêt et l'importance des composés organiques retrouvés dans les sédiments. Du fait de leur héritage biologique, ces composés font le lien entre les organismes produits et les conditions de l'environnement dans lesquels ils ont vécu. Selon Meyers (1997), nombre de ces composés ont des origines biologiques assez spécifiques et tous reflètent un contrôle enzymatique dans leur structure. L'utilisation des biomarqueurs comme outils dans les études paléoenvironnementales devient ainsi de plus en plus importante. Elle est liée à l'évolution technologique, d'une part, et d'autre part à la spécificité et à la finesse des informations que ces biomarqueurs apportent. Notre étude se focalise sur l'analyse de deux composés organiques spécifiques : les n-alcanes, et les alcénones. Les premiers sont utilisés comme marqueurs de la qualité et de l'origine de la MOS, les seconds permettent de reconstituer au degré près les variations des températures des eaux de surface.

#### III.3.4.1. Les n-alcanes

Les hydrocarbures, qui sont des composés organiques contenant exclusivement des atomes de carbone (C) et d'hydrogène (H), ne sont pas autant assujettis aux transformations et aux réactions diagénétiques post-dépositionnelles que les autres lipides qui possèdent des groupements fonctionnels oxygénés. Le fait de ne pas avoir d'autres liaisons que C-C et C-H rend, d'une façon générale, les alcanes assez peu réactifs, autrement dit stables. Ceci s'explique par le fait que les liaisons sont assez fortes ( $C-C = 82,6 \text{ kcal}\cdot\text{mol}^{-1}$  et  $C-H = 100 \text{ kcal}\cdot\text{mol}^{-1}$ ). La longueur des chaînes est un autre élément qui rend les lipides plus ou moins résistants à la dégradation. Parmi les n-alcanes (hydrocarbures linéaires saturés), les chaînes les plus longues sont moins

dégradables que les chaînes les plus courtes. La longueur des chaînes, et leur caractère pair ou impair, renseignent aussi sur les sources de la matière organique. Les n-alcane sont ainsi à la fois de bons marqueurs des conditions de transport de la MOS, du fait de leur meilleure résistance à la diagenèse, mais aussi de son état de préservation, et de ses origines.

Ainsi, la présence de certains n-alcane longs impairs ( $C_{27}$ ,  $C_{29}$ ,  $C_{31}$ ) indique la contribution des cires épicuticulaires des plantes terrestres. Ces dernières représentent l'une des sources importantes de lipides sédimentaires. Cranwell (1973) a montré que les types de végétation peuvent influencer la longueur des chaînes des lipides. En effet les lipides des herbacés montrent en moyenne des n-alcane à chaînes plus longues que les espèces forestières. Poynter *et al.* (1989) ont suggéré que les plantes de climats plus chauds produisent des composés en moyenne plus longs, proposant un contrôle latitudinal de la distribution des n-alcane. Des études récentes sur des échantillons atmosphériques (Simoneit *et al.*, 1991 ; Huang *et al.*, 2000 ; Schefus, *et al.*, 2003 ; Jeng, 2006 ; Philip A. Meyers communication personnelle) montrent que l'aridité du milieu peut s'exprimer dans les n-alcane produits par les végétaux supérieurs, avec un renforcement des chaînes les plus longues ( $C_{31}$ ,  $C_{33}$ ). Cependant, les algues sont représentées par les chaînes plus courtes, entre  $C_{15}$  et  $C_{21}$  (Philp, 1985 ; Peter & Moldowan, 1993 et références *in* Meyers, 1997). Outre cette caractéristique fréquemment rencontrée dans des sédiments marins, on note également la domination de chaînes paires des n-alcane courts, entre 14 et 22 carbones. L'explication la plus répandue pour cette distribution paire réside dans la réduction diagénétique par des acides gras comme précurseur, sans la perte d'1 carbone comme c'est le cas pour les chaînes impaires des végétaux supérieurs. Mais certains auteurs (Nishimura & Baker, 1986 ; Grimalt & Albaigés, 1987) ont proposé comme explication une formation directe de ces n-alcane dans les sédiments par des bactéries. Il faut ajouter à tout cela la dégradation et la pollution par des dérivés pétroliers qui ont tendance à effacer les dominations existant dans les diverses distributions.

Le tableau ci-dessous donne un aperçu de l'application des n-alcanes en tant que biomarqueurs.

**Tableau III-2 :** Les n-alcanes caractéristiques de divers organismes (d'après Philp, 1985 et Peters & Moldowan, 1993)

Organisme	Milieu	Nombre de carbones dominants	Gamme de distribution	Mode de distribution	CPI
Bactéries photosynthétiques	Aquatique (pelagique)	C <sub>17</sub> , C <sub>16</sub>	C <sub>14</sub> - C <sub>29</sub>	bimodal	bas
Bactéries non-photosynthétiques	Aquatique (benthique)	C <sub>17</sub> - C <sub>20</sub> C <sub>17</sub> et C <sub>25</sub>	C <sub>15</sub> - C <sub>28</sub> C <sub>15</sub> - C <sub>29</sub>	unimodal bimodal	bas bas
Champignons		C <sub>29</sub>	C <sub>25</sub> - C <sub>29</sub>	unimodal	-
Cyanobacteries	Aquatique (pelagique)	C <sub>17</sub>	C <sub>14</sub> - C <sub>19</sub>	unimodal	élevé
Algues	Aquatique (pelagique)	C <sub>15</sub> , C <sub>17</sub> , C <sub>19</sub>	C <sub>15</sub> - C <sub>21</sub>	unimodal	élevé
Algues brunes	Aquatique (benthique)	C <sub>15</sub>	C <sub>13</sub> - C <sub>26</sub>	unimodal	bas
Algues rouges	Aquatique (benthique)	C <sub>17</sub> ,	C <sub>15</sub> - C <sub>24</sub>	unimodal	bas
Zooplankton	Aquatique (pelagique)	C <sub>18</sub> , C <sub>24</sub>	C <sub>18</sub> - C <sub>34</sub> C <sub>20</sub> - C <sub>28</sub>	bimodal	bas
Plantes supérieures	Terrestre	C <sub>27</sub> , C <sub>29</sub> , C <sub>31</sub>	C <sub>17</sub> , C <sub>16</sub>	unimodal	élevé

Le pristane et le phytane sont des hydrocarbures isopréniques acycliques dont les chaînes comptent 19 et 20 carbones respectivement. Ces composés sont reconnus comme majoritairement dérivés de la dégradation du groupement fonctionnel phytyl (alcool diterpénique, C<sub>20</sub>H<sub>40</sub>O, chaîne latérale de la chlorophylle), par différentes réactions chimiques, hydrolyse/décarboxylation, selon l'oxygénation de l'environnement de dépôt oxydant ou réducteur (Didyk *et al.*, 1978 ; Volkman & Maxwell *in* Johns, 1986). L'emploi du rapport pristane/phytane (Pr:Ph) sert donc d'indicateur des conditions redox du milieu. Des rapports inférieurs à 1 sont obtenus

en situations anoxiques, et à l'inverse, quant le rapport Pr:Ph dépasse 1, les milieux sont considérés comme plutôt oxygénés. Volkman & Maxwell *op. cit.* vont plus loin en proposant pour des Pr/Ph proches de l'unité un environnement caractérisé par une alternance entre oxydation et réduction. D'autres chercheurs (ten Haven *et al.* 1987) ont proposé une utilisation limitée de ce paramètre et affirment que la présence du pristane reflète plutôt la productivité primaire tandis que le phytane est lié à l'activité de bactéries méthanogènes, et aussi à l'implication de la salinité. Cependant, ce rapport Pr:Ph reste pour la plupart un bon indicateur des environnements anoxiques.

Cranwell (1982), Meyers (1997), Volkman *et al.* (1998) entre autres ont passé en revue les lipides retrouvés dans les sédiments et résument les renseignements qui peuvent en être déduits :

**Les séries homologues** – Les molécules synthétisées par les organismes résultent d'un mécanisme d'élongation des composés de faible poids moléculaire par des unités acétate ( $\text{CH}_3\text{COO}^-$ ). Il en résulte une série de composés appartenant à la même famille qui diffèrent les uns des autres par deux carbones. Cette distribution en  $\text{C}_{n-2}$ ,  $\text{C}_n$  et  $\text{C}_{n+2}$  des alcanes, alcools, acides carboxyliques est souvent conservée dans les sédiments ;

**La gamme de distribution du nombre de carbones** – Chaque organisme fabrique une gamme variable de composés, cette gamme tend vers un nombre de carbones assez réduit pour ceux produits par les microorganismes aquatiques (plancton), alors que les végétaux supérieurs tendent à produire des composés plus complexes et avec beaucoup plus de carbones, en longues chaînes hydrocarburées.

**La distribution des séries homologues** - Considérant les séries homologues et la longueur des chaînes mentionnées ci-dessus, le mode de distribution des composés donne des informations sur les différentes contributions, où une distribution multimodale informe sur le nombre et le degré de participation des diverses sources.

**La mesure de la parité/imparité des chaînes** – C'est le rapport existant entre les composés à nombre de carbones impair et ceux à nombre de carbones pair pour les hydrocarbures. Cette relation est indicatrice d'une part de l'état de préservation de la famille de composés considérée et d'autre part c'est un indicateur de

source. Le plus simple de ces rapports est celui du pristane/phytane, qui renseigne sur les conditions redox.

En ce qui concerne les n-alcanes, le ratio le plus répandu est le CPI (indice de préférence de carbone, du terme anglais *Carbon Preference Index*), proposé par Bray & Evans (1961) et exprimé mathématiquement par Copper & Bray (1963) par l'équation suivante :

$$\text{CPI} = 0,5 * \left\{ \frac{\sum (C_i + C_{i+2} + \dots + C_n)}{\sum (C_{i-1} + C_{i+1} + \dots + C_{n-1})} + \frac{\sum (C_i + C_{i+2} + \dots + C_n)}{\sum (C_{i+1} + C_{i+3} + \dots + C_{n+1})} \right\}$$

Où : **i** est la limite inférieure de la série  
et  
**n** sa limite supérieure ;  
**i** et **n** sont des nombres impairs

Les CPI peuvent être calculés pour toutes les gammes de distribution des séries homologues. L'indice le plus fréquemment utilisé est celui calculé pour les séries de C<sub>15</sub> à C<sub>23</sub> et de C<sub>25</sub> à C<sub>33</sub> (Philp, 1985, Kennicutt *et al.*, 1987 ; Wakeham *et al.*, 1997, Huang *et al.*, 2000 ; Schefus *et al.*, 2003 et 2004 ; Jeng, 2006 ; Boot *et al.*, 2006). C'est un indicateur de la plus ou moins forte dégradation de la matière organique, et il permet aussi, lorsque ses valeurs sont très élevées (4 – 10), d'indiquer l'origine continentale de la MOS.

La longueur moyenne des chaînes (ACL, du terme anglais *Average Chain Length*) est aussi un paramètre de distribution. Comme le CPI, il aide à caractériser les différentes séries homologues. Ce paramètre décrit la quantité moyenne de carbones présente par molécule, pondérée par les abondances des molécules d'une distribution donnée. Le voici exprimé par l'équation ci-dessous :

$$\text{ACL} = \frac{\sum \{ (n-x)[C_{n-x}] + \dots + (n)[C_n] + \dots + (n+x)[C_{n+x}] \}}{\sum ( [C_{n-x}] + \dots + [C_n] + \dots + [C_{n+x}] )}$$

Où : **n** est le nombre de carbones de la chaîne centrale de la série en question.

Les gammes employées dans le calcul de l'ACL dépendent des distributions des séries homologues. Les plus souvent utilisées sont celles des végétaux supérieurs (C<sub>25</sub> – C<sub>33</sub>), ceci dans le but de tracer des variations de source et de conditions environnementales. Selon Poynter & Eglinton (1990) la distribution de l'ACL est liée à la distribution géographique aussi bien des apports fluviaux et éoliens que des régions sources de la MOS. Aucune contrainte n'existe dans l'application de l'ACL pour d'autres gammes de distribution.

En vue de la caractérisation des sources dans les distributions des séries de n-alcanes rencontrés dans les sédiments, Bourbonniere & Meyers (1996) ont proposé un indicateur pour évaluer les changements dans le mélange entre les hydrocarbures aquatiques et terrestres. Le TAR, du terme anglais *terrigenous/aquatic ratio*, ou ratio aquatique/terrestre, est estimé selon l'équation suivante :

$$\mathbf{TAR} = \frac{\Sigma ([C_{27}] + [C_{29}] + [C_{31}])}{\Sigma ([C_{15}] + [C_{17}] + [C_{19}])}$$

Les valeurs les plus élevées de ce paramètre indiquent l'augmentation de l'importance du matériel continental comme source des géolipides, au détriment des sources provenant de la colonne d'eau.

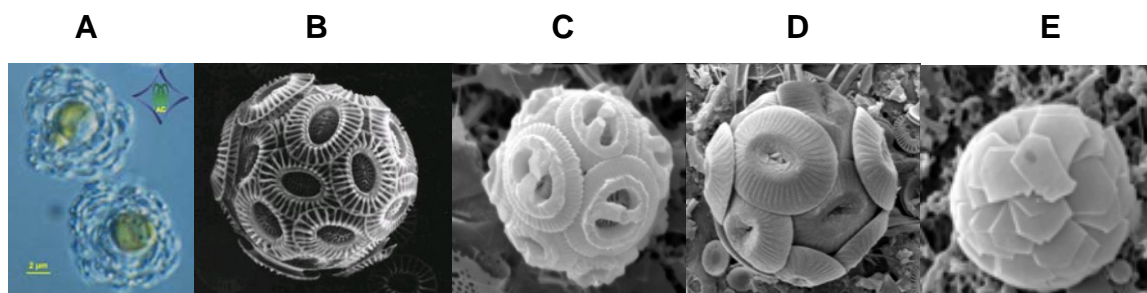
#### III.3.4.2. Les alcénones, indicateur paléothermométrie

Une autre application de l'analyse des composés organiques concerne la paléothermométrie, élément de grande importance pour les applications paléocéanographiques et paléoclimatiques. Les températures de surface donnent des informations sur les changements de courants, l'intensité des *upwellings* et la stratification de l'océan et des autres processus associés, comme les vents (Kim & Schneider, 2003). La recherche de marqueurs capables d'enregistrer ces conditions, et



qui permettent par la même occasion d'éviter les contraintes liées aux effets des volumes de glaces et de la dissolution des carbonates (dans le cas du rapport isotopique  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ), s'est dirigée naturellement vers les composés organiques. La fluidité de la membrane cellulaire est une donnée essentielle à l'adaptation des organismes aux conditions thermiques de l'environnement (Brassell, 1993). C'est sur cette caractéristique fondamentale que se sont focalisées la plupart des recherches dans ce domaine.

En effet des lipides, partie prenante dans la régulation de la perméabilité de la membrane cellulaire de certains organismes ubiquistes (Marlowe *et al.*, 1980 et 1984), ont été recensés comme bons enregistreurs des températures de surface. Ces composés, les alcénones, sont des cétones polyinsaturés à longues chaînes ( $\text{C}_{37}$  à  $\text{C}_{39}$ ), dont les principaux producteurs sont les algues coccolithophoridés (Figure III.6). Parmi ces algues, les alcénones sont particulièrement abondants dans l'espèce *Emiliana huxleyi* et *Gephyrocapsa spp* (Marlowe *et al.*, 1984 ; Volkman *et al.*, 1980 et 1995). Le nombre de doubles liaisons présentent dans les chaînes de méthyl- et éthyl-alcénones varient de 1 à 4, et leur proportion augmente quand la température diminue (Figure III.7).



**Figure III-6 :** Quelques coccolithophoridés :

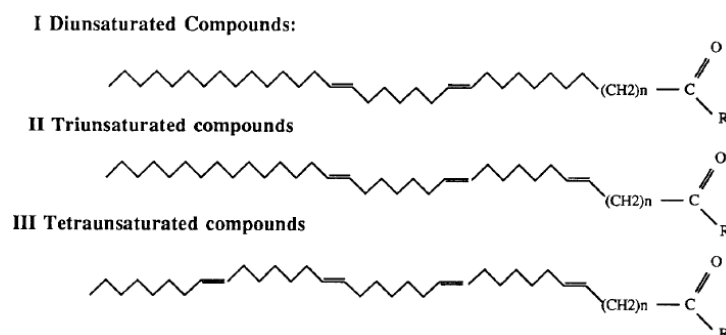
- A et B** - *Emiliana huxleyi* ;
- C** - *Gephyrocapsa oceanica* ;
- D** - *Coccolithus pelagicus* ;
- E** - *Florisphaera profunda*.

**Source:** <http://www.ucl.ac.uk/GeolSci/micropal/calcnanno.html#neogeneimages>

Des expériences d'incubation à différentes températures et des investigations en conditions réelles (Marlowe, 1984 ; Prahl & Wakeham, 1987 ; Prahl *et al.*, 1988), ont permis d'établir et de valider l'indice d'insaturation des alcénones proposé par Brassell *et al.* (1986). Cet indice, l' $U_{37}^k$ , a été établi pour permettre une comparaison directe entre les résultats dérivés des cultures et ceux issus d'échantillons naturels, et calculé en prenant en compte uniquement les concentrations des alcénones à 37 carbones ( $C_{37:2}$ ,  $C_{37:3}$  et  $C_{37:4}$ ). L' $U_{37}^k$  peut être simplifié ( $U_{37}^{k'}$ ) par l'élimination de l'alcénone plus insaturé ( $C_{37:4}$ ), étant donnée sa fréquente absence dans les sédiments. Les indices  $U_{37}^k$  et  $U_{37}^{k'}$ , sont calculés d'après les équations suivantes :

$$U_{37}^k = \frac{[C_{37:2}] - [C_{37:4}]}{[C_{37:2}] + [C_{37:3}] + [C_{37:4}]} \quad U_{37}^{k'} = \frac{[C_{37:2}]}{[C_{37:2}] + [C_{37:3}]}$$

La relation entre les proportions d'insaturation des alcénones (exprimées par l' $U_{37}^k$  et l' $U_{37}^{k'}$ ) et les températures a été établie par divers auteurs après les révisions de Prahl & Wakeham (1987) et Prahl *et al.* (1988), l'équation adoptée comme standard de calibration pour la conversion des indices d'insaturation en températures (°C) est la suivante :  $U_{37}^{k'} = 0,034T + 0,039$ . Cette dernière fut encore révisée et améliorée par Rosell-Melé *et al.* (1995) et ensuite par Müller *et al.* (1998), qui a calibré l'équation en se basant sur l'analyse de sommets de carottes de tout le globe entre 60°N et 60°S, mais principalement dans l'Océan Atlantique Sud. Sikes *et al.* (1993 et 1997) ont à leur tour amélioré la relation pour les régions polaires.



**Figure III-7 :** Les structures chimiques des divers alcénones à 37 carbones

Source : Conte *et al.* (1998)

L'application des alcénones n'est toutefois pas totalement infallible. Certains facteurs peuvent augmenter l'incertitude ou altérer les estimations des températures. Parmi ces facteurs, on trouve le diachronisme entre différents enregistrements de paléotempératures, la co-élution des alcénones et de certains esters lors de l'analyse chromatographique, le transport latéral et les remaniements de sédiments qui déplacent le centre de dépôt par rapport au centre de production, les effets physiologiques et métaboliques des organismes qui produisent les alcénones, les réactions d'oxydation et de stéréomutation, et enfin la dégradation bactérienne des alcénones (Vilanueva *et al.*, 1997 ; Conte *et al.*, 1998 ; Gong & Hollander, 1999 ; Epstein *et al.*, 2001 ; Mollenhauer *et al.*, 2003 ; Sachs & Anderson, 2003 ; Rontani *et al.*, 2005, 2006 a et b, 2008 ). Mix *et al.* (2000) et Sachs *et al.* (2000), ont fait une révision complète sur le sujet et ont proposé des stratégies futures pour l'amélioration de ce marqueur.

Dans le cadre de cette thèse, les niveaux sédimentaires sélectionnés pour être analysés sous l'angle moléculaire, ont suivi la logique d'un échantillon tous les cinq centimètres. En plus de ces niveaux, d'autres échantillons furent choisis de manière à prendre en compte la variabilité du COT.

Afin de tenir compte de la grande différence existant entre les teneurs organiques des sédiments de la côte brésilienne et ceux de la côte péruvienne et de l'évolution des moyens analytiques, des adaptations ont été mise en œuvre et différentes méthodes ont été employées pour les deux sites. Les détails concernant les méthodes appliquées à chaque site sont présentés dans leur chapitre respectif.

#### **III.3.4.3. Extraction et séparation de la fraction lipidique libre**

Les échantillons ont été extraits pendant 10-15 min sous ultrasons trois fois avec respectivement dichlorométhane, dichlorométhane:méthanol (1:1<sub>v:v</sub>) et méthanol. Les différents extraits ont été mélangés et évaporés sous vide avant d'être pesés. Ils ont

ensuite été re-solubilisés, ajoutés à une petite quantité de silice et re-séchés, afin de faciliter la dépose de l'extrait pour la séparation chromatographique liquide sur mini-colonnes qui a suivi.

La méthode de séparation utilisée fut adaptée de celle décrite par Ternois *et al* (1998), pour la séparation de l'extrait lipidique total en diverses sous-fractions. Les colonnes chromatographiques utilisées ont été construites avec des pipettes pasteur remplies de 4,5 cm de silice 100-200 mesh. Cette silice a été préalablement activée pendant 24h à 110°C et ensuite désactivée avec 5% d'eau ultra pure. L'extrait sec mélangé à la silice est déposé manuellement en tête de colonne, le reste de l'extrait sec est repris avec 500 µl d'heptane à l'aide de micro-seringues et aussi déposé en tête de colonne. Les différentes fractions ont ensuite été éluées respectivement par :

- *Fraction 1* : 2 ml d'heptane (hydrocarbures) ;
- *Fraction 2* : 1 ml d'heptane + 2 ml d'heptane : toluene (75:25) (HAPs\*) ;
- *Fraction 3* : 2 ml d'heptane:toluene (50:50) (esters de cires);
- *Fraction 4* : 2 ml d'heptane:acétate d'éthyle (95:05) +  
2 ml d'heptane:acétate d'éthyle (90:10) (alcénones);
- *Fraction 5* : 2 ml d'heptane:acétate d'éthyle (85:15) (alcools),
- *Fraction 6* : 2 ml d'heptane:acétate d'éthyle (80:20) (stérols),
- *Fraction 7* : 3 ml acétate d'éthyle + 3 ml of méthanol (polaires).

\* HAP = hydrocarbures aromatiques polycycliques

Les éluats ont été récupérés directement dans des vials de 4ml, les solvants évaporés sous flux de N<sub>2</sub> sous hotte, et ont ensuite été stockés au congélateur avant d'être analysés par chromatographie en phase gazeuse couplée spectromètre de masse (CG-SM) ou chromatographie en phase gazeuse avec détection par ionisation de flamme (CG-FID).

La méthode a été validée par l'analyse de certains échantillons (MD87-900 et MD87-2050) en provenance de la zone d'*upwelling* de Benguela et préalablement étudiés

dans cadre de la thèse de Pichevin (2004). Ces échantillons présentaient de grands écarts de COT et les températures ainsi rencontrées ont été en accord dans les limites de la méthode ( $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ) (Laëticia PICHEVIN communication personnelle, mars 2005).

#### III.3.4.4. Les analyses chromatographiques

L'identification des molécules présentées dans ce travail ont été réalisées à l'aide du couplage chromatographie en phase gazeuse / spectromètre de masse (CG-SM), basé sur des fragmentogrammes et des ions spécifiques caractéristiques de chaque molécule, issus de la littérature et de la base de données du logiciel Xcalibur® (Bibliothèque NIST et Bibliothèque ISTO).

La quantification des alcénones a été réalisée sur un chromatographe en phase gazeuse Perkin - Elmer Auto System XL®, doté d'un détecteur par ionisation de flamme - FID (« *flame ionisation detector* »), et à l'aide du logiciel Turbochrom®. Les n-alcanes ont été quantifiés sur la base du courant ionique total – TIC (« *total ionic courant* »), et à l'aide du logiciel Xcalibur® sur le système couplé CG-SM.

Le système couplé CG-SM est composé d'un chromatographe en phase gazeuse, Thermofinnigan – TRACE 2000®, et d'un spectromètre de masse, Thermofinnigan – GCQ Polaris®. Le SM est de type trappe à ions à ionisation externe. Il comporte quatre modules d'analyse : un module d'ionisation (volume d'ion et filament d'ionisation), un module d'accélération des ions vers la trappe (lentilles et porte), un module de séparation des ions (trappe à ions) et un module de quantification des ions (anode et multiplicateur d'électrons). Toutes les analyses ont été réalisées par ionisation électronique en mode positif à 70eV, bien que l'ionisation chimique soit possible sur ce type d'appareil, et la gamme de masse des fragments analysés est de 50 à 650amu. Pendant toute la durée des analyses la ligne de transfert CG-SM a été maintenue à 300°C.

Les paramètres et spécifications utilisés pour les analyses des n-alcanes et des alcénones sont montrés ci-dessous :

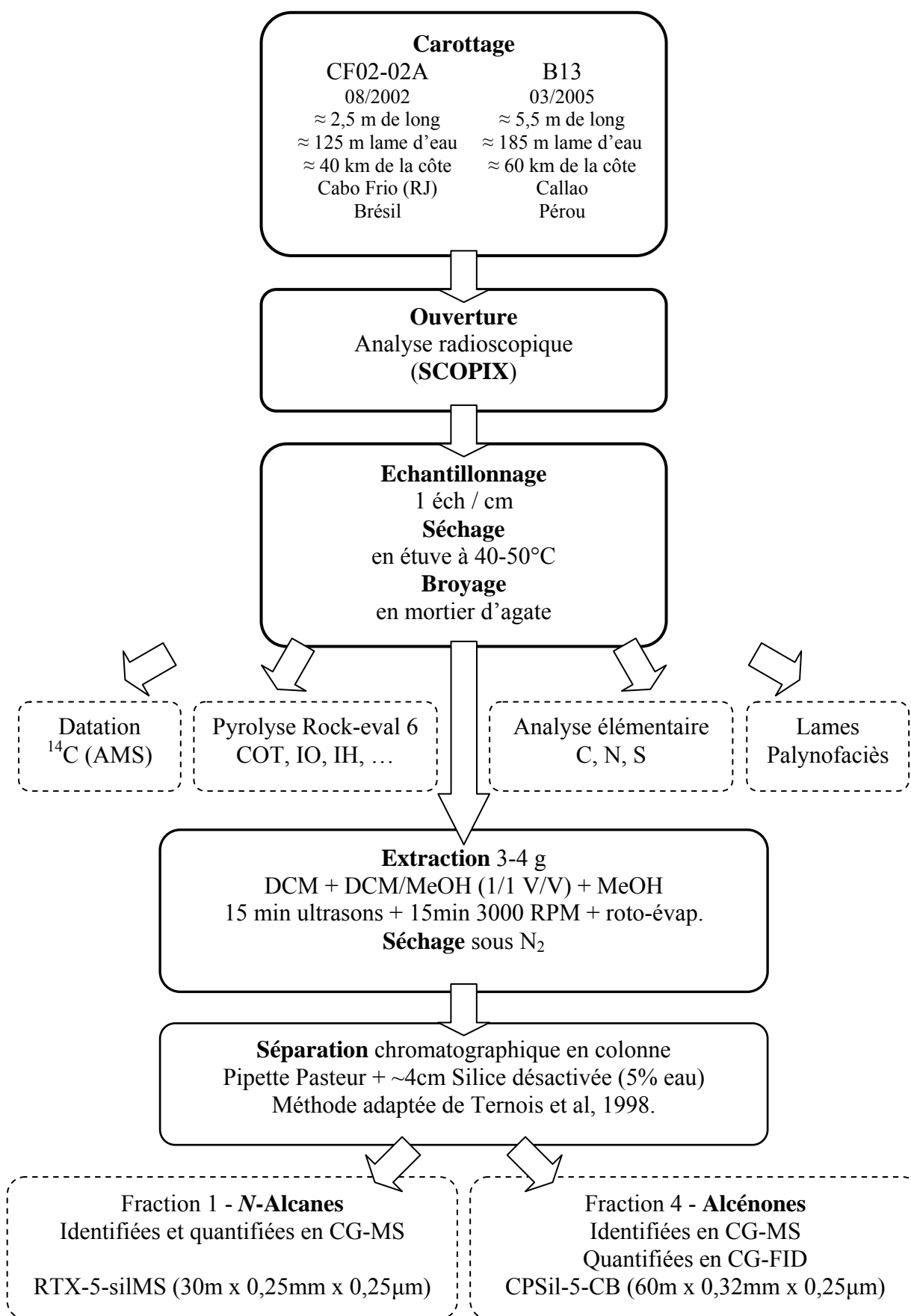
- **n-alcanes**

Pour les n-alcanes, l'analyse chromatographique de la fraction 1 a été réalisée sur une colonne de silice capillaire (RTX-5-silMS) de 30m de long, 0,25 mm de diamètre interne, 0,25  $\mu\text{m}$  d'épaisseur de phase, et comprenant 5m de colonne de garde. La programmation de température commence par un isotherme d'une minute à 40°C, puis une montée rapide de température de 40 à 120°C à raison de 30°C\*min<sup>-1</sup>, une montée plus lente jusqu'à 300°C à 3°C\*min<sup>-1</sup> et finalement un palier à 300°C, pendant 30 minutes. L'injecteur est réglé à 280°C et le détecteur à 300°C. Le gaz vecteur utilisé est l'He.

- **alcénones**

Pour l'analyse des alcénones, la fraction 4 a été analysée en CG-FID dont la colonne capillaire utilisée était du type CPSil-5-CB de 60m de long, 0,32 mm de diamètre interne et 0,25  $\mu\text{m}$  d'épaisseur de phase. Cette colonne permet une meilleure séparation entre les pics des alcénones C<sub>37</sub> et évite la co-élution de certains esters, ce qui n'est pas le cas d'une colonne de 30m. La programmation de température débute à 50°C pendant 1 minute, puis une rampe de 30°C\*min<sup>-1</sup> jusqu'à 150°C. L'analyse se termine par un isotherme à 310°C pendant 20 mn. L'injecteur est réglé à 250°C et le détecteur à 300°C. Le gaz vecteur est de l'He.

On trouvera ci-dessous un schéma descriptif des étapes d'analyse successives réalisées, ainsi qu'un tableau synthétisant les différents marqueurs employés dans cette étude.



**Figure III-8** : Schéma méthodologique de l'étude

**Tableau III-3 :** Synthèse méthodologique des différents marqueurs de la matière organique sédimentaire marine utilisés.

Méthode	Marqueur	Indicateur de
Péetrographie	Comptage et distribution des palynofaciès	Origine et qualité de la préservation de la MOS (productivité et influences d'origine terrestre)
Géochimie élémentaire	Dosage total C, N, S	Caractéristiques organiques et lithologiques sédiments
	Rapport C:N	Origines de la MOS (environnement marin – algues, ou terrestre – végétaux supérieurs)
Géochimie par pyrolyse Rock-Eval	Diagramme IH x IO Diagramme S2 x COT	Origine et état de la MOS : biomasse microbienne, algues et cires/résines végétales en milieu lacustre (type I), biomasse planctonique marine (type II), plantes terrestres (types III); différenciation entre types I et II oxydés et type III par le diagramme S2 x COT en complément du diagramme IO x IH
Géochimie moléculaire	n-alcanes : <ul style="list-style-type: none"> <li>longueur des chaînes</li> </ul>	Production, transport et état de préservation de la MOS : <ul style="list-style-type: none"> <li>productivité primaire passée (concentration de chaînes courtes)</li> <li>origine autochtone (aquatique : algues, bactéries, champignons, zooplancton, phytoplancton) ou allochtone (terrestre / végétaux supérieurs : cires épicuticulaires, herbacés, espèces forestières ; éolienne) ;</li> <li>milieu des zones source : climat plus chaud / plus froid ; indicateur d'aridité</li> </ul>
	alcénones : indices d'insaturation des alcénones $U_{37}^k$ et $U_{37}^{k'}$	Marqueur de la variation de la température des eaux de surface des océans – bon indicateur de la paléothermométrie océanique (changements de courants, intensité des <i>upwellings</i> , stratification des océans, vents...).





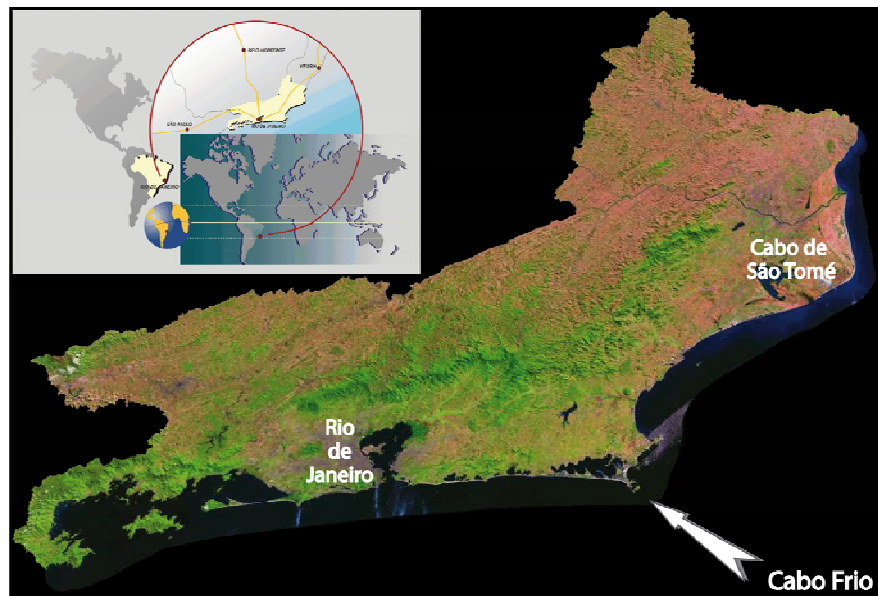
## **IV – Site Atlantique sud-ouest**

### **IV.1. Caractérisation environnementale**

#### **IV.1.1 Contexte général**

Cabo Frio, « le Cap Froid », est situé dans la partie centrale de la côte de l'État de Rio de Janeiro, à 120 km à l'est de la ville de Rio de Janeiro (figure IV.1-1). Les caractéristiques géologiques régionales du relief sont attribuées aux activités tectoniques d'âge Cénozoïque qui ont divisé le socle Précambrien en une série de blocs inclinés et renversés (Penha, 1999 ; Turcq *et al.*, 1999). Du nord au sud, on identifie les structures successives suivantes : une très large plaine côtière construite en forme de delta, un massif montagneux, la *Serra do Mar*, excédant 2000 m d'altitude, le fossé d'effondrement de Guanabara, les massifs littoraux, atteignant 1000 m d'altitude, et

l'extrémité nord du bassin sédimentaire de Santos. Plus à l'est, une succession de flèches composées de roches cristallines atteint l'océan et divise la plaine côtière en différents compartiments et systèmes lagunaires : Jacarepaguá, Piratiningua-Itaipu, Itaipuaçu, Maricá-Guarapina, Jaconé-Saquarema et Araruama, tandis qu'à l'ouest la montagne rejoint la mer et forme diverses baies (figure IV.1-1). Le système de drainage est étroitement contrôlé par les failles, conjuguées, et d'autres éléments structuraux des roches métamorphiques (Turcq *et al.*, 1999). La majorité des unités sédimentaires continentales de la partie centrale du littoral de Rio de Janeiro est composée de sédiments tertiaires et quaternaires, généralement silico-argileux (Tasayco Ortega, 1996, Penha 1999, Perrin 1999).



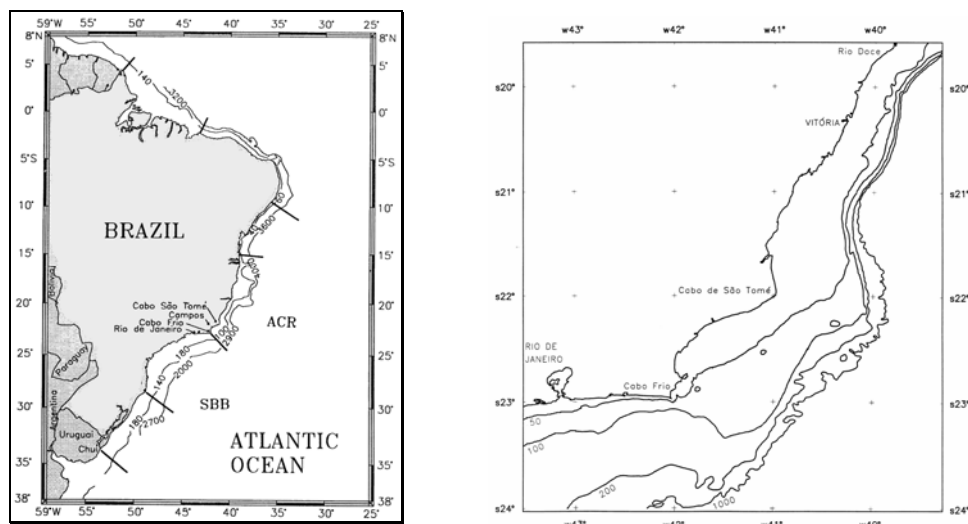
**Figure IV.1-1** : Image satellitale de l'État de Rio de Janeiro (Brésil)

**Source** : <http://www.cdbrasil.cnpm.embrapa.br/>

La marge continentale brésilienne est de type divergent, passive, très stable, soumise à de faibles mouvements épirogéniques à l'état actuel. La plateforme continentale présente pourtant un profil simple et régulier. Face au Cap de São Tomé, elle s'étend sur environ 80 km, avec des profondeurs comprises entre 60 et 100m ; au large du Cabo Frio la plateforme est plus étroite ( $\approx 50$  km) et plus profonde ( $\approx 180$ m) et en allant vers le sud elle s'élargit de manière considérable ( $\approx 230$  km), prenant une

forme de croissant (enfoncement sud brésilien) (figure IV.2-2). La topographie de cet enfoncement est très douce avec des isobathes bien parallèles à la côte. Durant les périodes les plus récentes, divers événements transgressifs et régressifs ont façonné cette plateforme et ont donné naissance à différents systèmes topographiques : escarpements et terrasses marines sur les plaines côtières, bassins de sédimentation sur la plateforme et enfin complexes turbiditiques sur le talus continental (Corrêa & Villwock, 1996).

La plateforme sud-ouest du Brésil, selon Castro & Miranda (1998), est comprise entre la région du complexe récifal d'Abrolhos, le Rio Doce et la chaîne Vitória-Trindade ( $18^{\circ}$ - $20^{\circ}$ N) au nord et le cap Santa Marta au sud ( $28^{\circ}30'S$ ) (Figure IV.1-2). Dans cette partie de la côte brésilienne, le Cabo Frio, « Cap froid » ( $23^{\circ}$ S,  $42^{\circ}$ W), est un point particulier au niveau duquel la ligne de côte change d'orientation. L'alignement nord-sud prend brusquement une direction est-ouest. Cette inflexion s'accompagne d'une importante altération du profil bathymétrique de la plateforme continentale : l'isobathe de 100 m est très près de la côte au sud du cap, laissant la majeure partie du plateau continental à des profondeurs comprises entre 100 et 200 m (Rodrigues & Lorenzetti, 2001 ; Valentin, 1984).



**Figure IV.1-2** : Localisation de la zone d'étude. D'après Castro & Miranda (1998) et Lorenzetti (2001).

### IV.1.2. Circulation océanique de la région

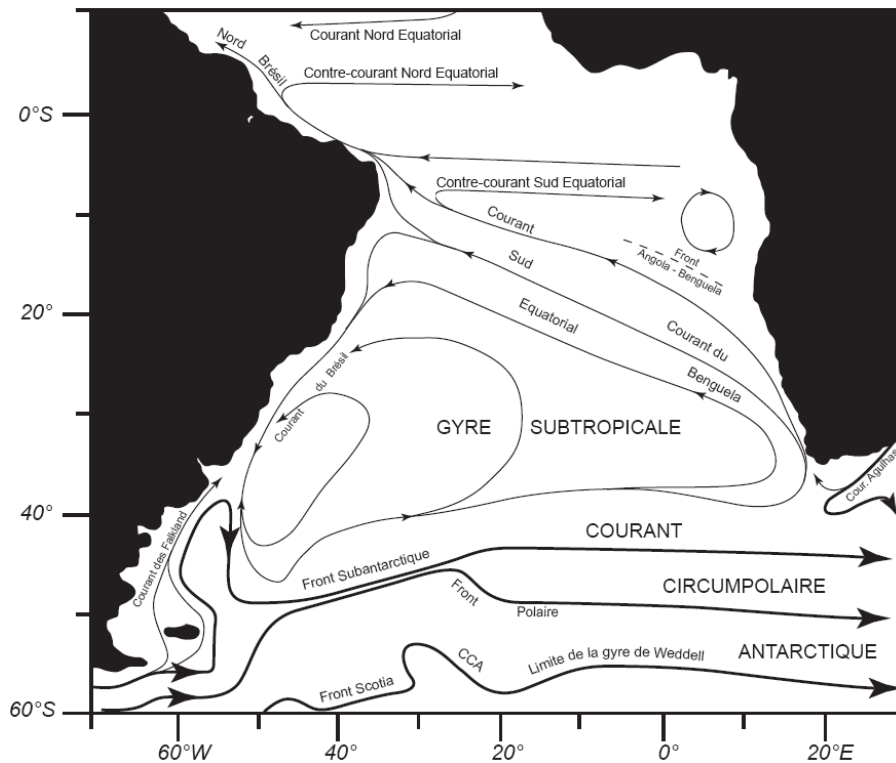
La circulation océanique régionale est dominée principalement par le Courant du Brésil. Ce Courant du Brésil prend son origine à environ 10°S où le Courant Sud Équatorial (CSE) bifurque non loin du Cap de São Roque en deux branches. La branche Nord, circulant vers l'équateur, correspond au Courant Nord Brésilien (CNB), par contre celle qui circule du Nord vers le Sud donne naissance au courant du Brésil. Ce courant (CB) est un faible courant de bord ouest, qui porte l'eau subtropicale chaude vers le sud, le long de la côte du Brésil, et est généralement confiné aux 600m supérieurs de la colonne d'eau (figure IV.1-3) (Stramma *et al.*, 1990 ; Podesta *et al.*, 1991). Le Courant du Brésil s'éloigne légèrement de la côte vers 12°S où le plateau continental devient plus large (Peterson & Stramma, 1991 ; Stramma *et al.*, 1990) et se heurte contre le Courant des Malouines (CM) (aussi connu sous le nom anglais Courant des Falklands) de flux nord. Le CB est alors, en partie, braqué à l'est devant le *Rio de la Plata* ( $\approx 40^\circ\text{S}$ ), une région connue sous le nom de zone de Confluence Brésil-Malvinas (CBM), une des zones les plus énergiques de tous les océans (Sarceno *et al.*, 2004).

Le transport du courant du Brésil est considéré faible lorsqu'il est comparé à celui du courant du Golfe, son homologue dans l'Océan Atlantique Nord. Des valeurs de transport entre 5 Sv<sup>8</sup> et 6.5 Sv près des eaux de surface (premiers 500m) ont été observées entre 12°S et 19°S (Peterson & Stramma, 1990 ; Stramma *et al.*, 1990). À environ 20,5°S, le CB rencontre la chaîne Vitória-Trindade, une chaîne de monts sous-marins, où les flux de transport sont plus importants au niveau des côtes qu'au large. Dans cette région, un tourbillon cyclonique se forme et est bien documenté (Memery *et al.*, 2000 ; Stramma *et al.*, 1990), le courant coule à environ 50-60 cm\*s<sup>-1</sup> comme estimé par Evans *et al.* (1983). Selon Castro (1998), des mesures réalisées à proximité du Cabo Frio indiquent que presque la moitié des 11 Sv transportés par le CB se concentre localement entre la côte et l'isobathe de 200 m. À partir de 24°S, l'écoulement du CB s'intensifie de 5% environ tout les 100 km. Cette augmentation est comparable au taux

---

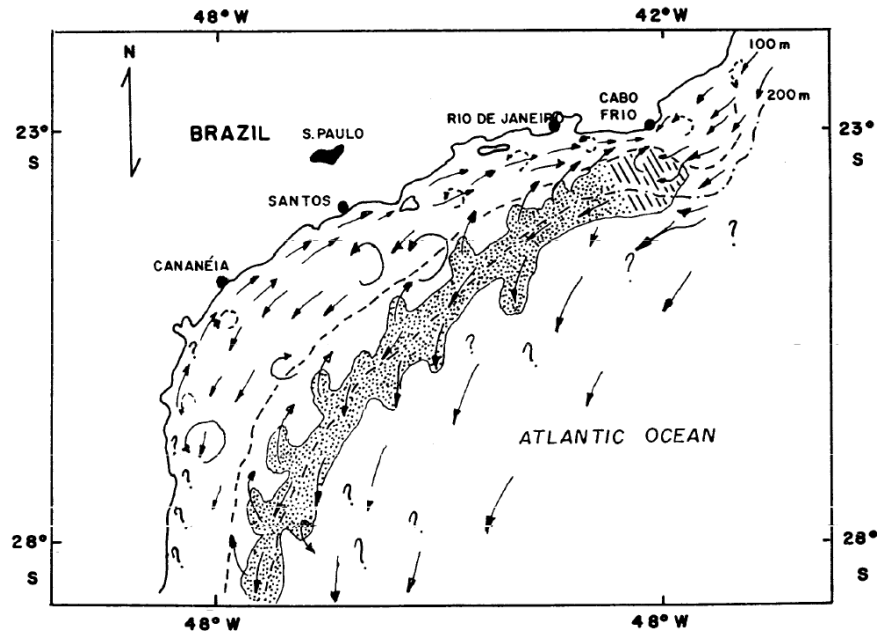
<sup>8</sup> 1 Sverdrup (Sv) est équivalent à 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>\*s<sup>-1</sup> (0.001 km<sup>3</sup>\*s<sup>-1</sup>).

de transport du Courant du Golfe, bien que les valeurs du CB soient considérablement inférieures (Peterson & Stramma, 1991). Ainsi, à environ 33°S le transport total est de 18 Sv, et atteint des valeurs de 19-22 Sv aux alentours de 38°S, où le CB rencontre le CM (Olson *et al.*, 1988 ; Peterson & Stramma, 1991).



**Figure IV.1-3** : Représentation schématique de la circulation océanique de surface dans l'Océan Atlantique Sud (Peterson & Stramma, 1991).

À une échelle plus locale, la circulation laisse penser que l'influence des eaux de la Baie de Guanabara sur les conditions hydrologiques de la région du Cabo Frio est plus que probable (figure IV.1-4). Lorsque, sous l'action de la marée et des courants, celles-ci s'écoulent vers l'est; on observe, surtout pendant l'été, une nette limite entre les eaux tropicales chaudes et salées venant du nord et celles, moins salines ( $S < 35$ ), de direction opposée (plus exactement W-SW) et occupant en surface la frange côtière au sud-ouest du Cabo Frio (Valentin, 1984). Cette influence est soulignée par la composition argileuse des corps vaseux situés au large du Cabo Frio (Saavedra *et al.*, 1999).



**Figure IV.1-4:** Distribution schématique des courants superficiels de l'enfoncement sud-brésilien. (Mesquita, 2000).

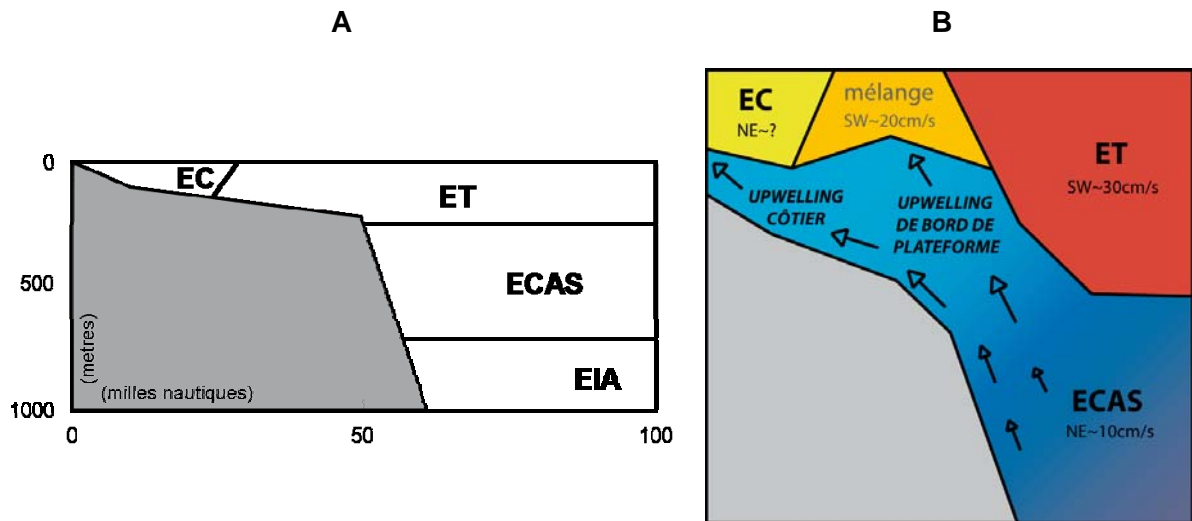
### IV.1.3. Origine et caractéristiques des eaux marines

La distribution verticale des masses d'eau de la région côtière et océanique de l'État de Rio de Janeiro (figure IV.3-5) est dominée par la présence de l'Eau Tropicale (ET), chaude ( $T > 18^{\circ}\text{C}$ ), de salinité élevée ( $S > 36$ ) et oligotrophique, portée par le Courant du Brésil (CB). Cette masse d'eau, limitée à la couche superficielle ( $0 \approx 200\text{m}$ ), est répandue tout au long de la bordure de la plateforme continentale et du talus continental supérieur au-dessus de la thermocline permanente.

Entre des profondeurs de 200-300 et 700-800 m, l'Eau Centrale de l'Atlantique Sud (ECAS) est une eau subtropicale dont les températures sont comprises entre  $7^{\circ}\text{C}$  et  $18^{\circ}\text{C}$  avec des salinités de 34,5 à 36, et riche en nutriments. Elle prend naissance au niveau de la zone de confluence subtropicale ( $\sim 40^{\circ}\text{S}$ ) entre le Courant des Malouines (CM) et celui du Brésil où elle plonge sous le CB et est transportée en direction du nord le long du talus continental. Saisonnièrement, l'ECAS peut atteindre la plateforme

continentale (au-delà des 50m de profondeur), surtout dans la région de l'enfoncement sud-brésilien.

Le mélange entre les eaux tropicales et subtropicales (ET et ECAS) et des eaux sous forte influence terrigène, donne naissance à l'Eau Côtière (EC). Placées sur la plateforme interne, entre la ligne de côte et des profondeurs généralement inférieures à 50 m, ces eaux ont une salinité extrêmement variable et une température intermédiaire. Les eaux du CB n'atteignent que rarement le littoral mais participent toutefois aux caractéristiques hydrologiques de la région en se mélangeant aux eaux côtières (Miranda, 1985 ; Neves, 1988 ; Mesquita, 2000).



**Figure IV.1-5 : A** – Distribution verticale des masses d'eau au large du Cabo Frio. Adapté de (REDEPETRO, 2000) et (Castro, 1998).

**B** – Schéma du mécanisme de remontée des eaux profondes au large du Cabo Frio. Adapté de Mesquita (2002) et Braga (2001).

EC – eau côtière ; ET – eau tropicale ; ECAS – eau centrale de l'Atlantique Sud ; EIA – eau intermédiaire Antarctique. Cette dernière eau n'atteint jamais la plateforme continentale, restant au-dessous des 700m

Les limites déterminantes de ces masses d'eau d'interet sont présentées dans le tableau IV.1-1.

**Tableau IV.1-1** : Caractéristiques des masses d'eau observées dans le bassin de Campos.

Masse d'eau	salinité	température	lame d'eau
AT	> 36	> 18 °C	< 200 m
ACAS	34,5 - 36	6 - 18 °C	200 - 700 m



#### IV.1.3.1. La productivité primaire régionale

La région de remontées d'eaux froides du Cabo Frio est étudiée depuis longtemps par l'Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM) de la Marine Nationale Brésilienne, situé dans le Cabo Frio même. De grands efforts ont été entrepris pour connaître la structure physique et biologique de cet *upwelling* à partir des années 1960-70 (Silva, 1971 a et b, Mascarenhas *et al.*, 1971, Luedemann & Rock, 1971, Valentin *et al.*, 1978).

La plateforme continentale entre Vitória et Rio de Janeiro présente généralement des caractéristiques oligotrophiques ( $0,04 - 0,90 \text{ mg C} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ ), sous influence du courant du Brésil. Dans des poches isolées et proches de la côte, on trouve des caractéristiques mésotrophiques et oligotrophiques où la présence temporaire de l'ECAS se fait ressentir (Dias *et al.*, 1982 ; REDEPETRO, 2000).

La productivité primaire de l'*upwelling* du Cabo Frio, déterminée sur plusieurs cycles d'*upwelling*/ *downwelling* par Gonzales-Rodriguez et al (1992), varie entre 2 et 14  $\text{mg C} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$  ( $0,5$  à  $6,0 \text{ mg}$  de chlorophylle par  $\text{m}^{-3}$ ), à condition que l'ECAS soit présente dans la couche euphotique. Selon les mêmes auteurs, et d'autres cités par eux, les remontées d'eaux profondes du Cabo Frio sont moins productives que d'autres zones d'*upwellings*, comme la côte de l'Oregon ( $5 - 20 \text{ mg chloroph.} \cdot \text{m}^{-3}$ ), les côtes du NW africain ( $15 - 31 \text{ mg chloroph.} \cdot \text{m}^{-3}$ ), ou la côte du Pérou ( $10 - 40 \text{ mg chloroph.} \cdot \text{m}^{-3}$ ). La progression du bloom phytoplanctonique au Cabo Frio est similaire à la séquence rencontrée dans la région de Benguela (sud ouest de la côte africaine), mais les valeurs atteintes ne sont pas aussi élevées en biomasse ou en productivité ( $24 \text{ mg chloroph.} \cdot \text{m}^{-3}$  et  $167 \text{ mg C} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$  respectivement).

L'écart de grandeurs trouvé entre l'*upwelling* du Cabo Frio et celui de Benguela (et aussi probablement pour les autres), peut être facilement expliqué par la différence des teneurs en azote, élément limitant dans la zone du Cabo Frio. Diniz *et al.* (2003) ont identifié, en plus de l'azote, le cuivre et possiblement le fer comme d'autres éléments limitant la productivité primaire locale du Cabo Frio.

Valentin (1985) *in* REDEPETRO (2000) a montré que les masses d'eau du CF sont caractérisées chacune par la présence des micro-organismes phyto-planctoniques suivants :

- ET : dominé par des dinoflagellés, comme *Prorocentrum* et *Peridinium* ;
- ECAS : dominé par des diatomées benthiques, comme *Diploponeis bombus*, *D. Didyma* et *Paralia sulcata*, en raison de la remise en suspension des sédiments par les turbulences et les courants de fond. À noter, l'absence quasi-totale de phytoplancton ;
- EC : le phytoplancton montre une grande diversité, dans laquelle dominant toutefois les genres *Rhizosolenia*, *Chaetocerus*, *Coscinodiscus*, *Nitzschia* et *Bidulphia*.

La succession écologique provoquée par la résurgence durant la phase de productivité la plus intense est dominée par *Leptocylindrus danicus*, *Skeletonema costatum*, *Nitzschia closterium*, *Rhizosolenia fragilissima* et *Asterionella glacialis*.

Valentin (1984 a et b, 1993) a montré que dans la région du Cabo Frio la communauté zooplanctonique est abondante et présente une faible diversité spécifique, ce qui n'est pas caractéristique des zones tropicales, où la biomasse de zooplancton est faible et la diversité spécifique est élevée. *L'upwelling* maintient donc des espèces subtropicales et des herbivores filtreurs comme Thaliacea, Cladocera et Copepoda. La distribution de ces derniers est un bon indicateur de l'influence de l'*upwelling*. Valentin et Moreira (1978) *in* Gonzalez-Rodriguez *et al.* (1992) ont mesuré une moyenne annuelle de poids sec de zooplancton allant jusqu'à 110 mg.\*m<sup>-3</sup>, ce qui démontre que le Cabo Frio est aussi riche en zooplancton que d'autres zones d'*upwelling*, comme la côte mauritanienne par exemple (20 – 130 mg\*m<sup>-3</sup>).

Gonzalez-Rodriguez *et al.*, 1992 formulent deux hypothèses pour expliquer la faible productivité du Cabo Frio : la première serait la dispersion de la biomasse par d'intenses courants d'advection, étant donnée la vitesse élevée des vents dans la région. Les forts courants maintiennent en effet un apport constant de nutriments par l'ECAS, lesquels génèrent une biomasse qui est dispersée par ces mêmes courants. La deuxième hypothèse serait l'« herbivorie », qui est responsable d'une réduction allant jusqu'à 25% de la biomasse de phytoplancton et jusqu'à 66% de la productivité primaire (Beers *et*

*al.*, 1971, Radach, 1980, cités *in supra*, 1992). La pression du « pâturage » du zooplancton sur le phytoplancton étant estimée à 50%.

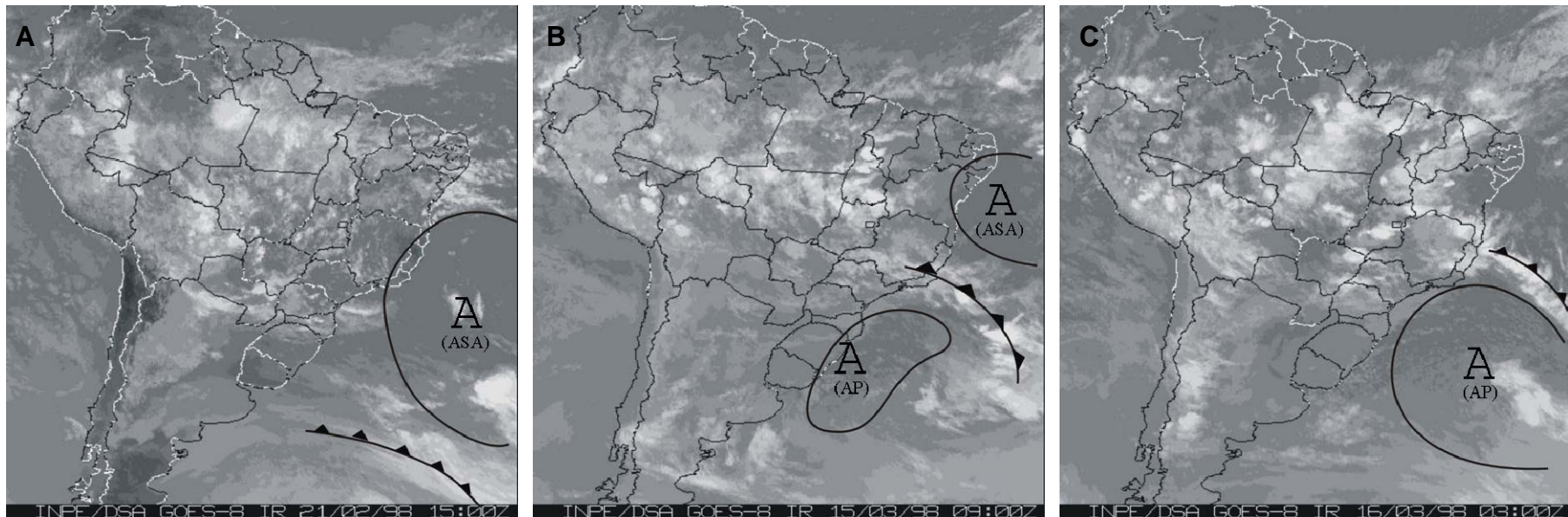
#### IV.1.4. Système climatique régional

Le système climatique de la région du Cabo Frio est sous la dépendance de deux anticyclones.

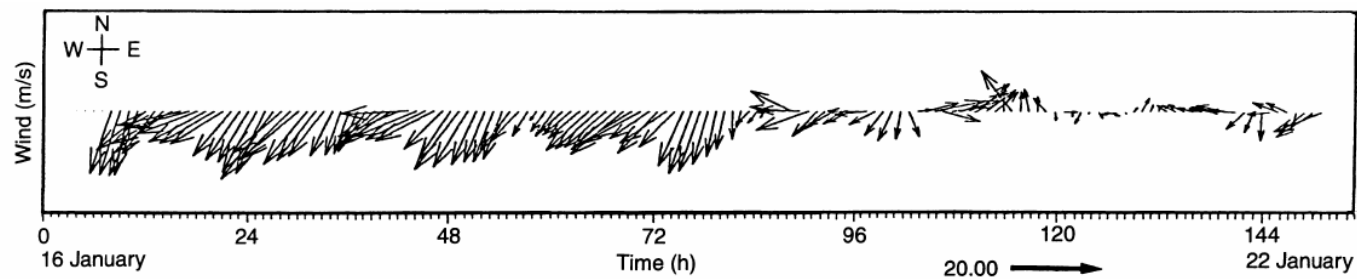
1. L'anticyclone subtropical de l'Atlantique Sud (ASA), qui est associé à la masse d'air tropical maritime chaud, prédomine sur le secteur est de l'Amérique du Sud. L'ASA oscille au cours des saisons, en été il est localisé plus au sud et à l'est (environ 30°S, 15°W), et plus au nord et à l'ouest en hiver (environ 22°S, 30°W). Ce système génère des vents divergents et contraires au sens des aiguilles d'une montre, autour de son noyau. Il génère les conditions météorologiques les plus fréquentes de la région, avec des vents de cadran nord-est d'intensités faibles à modérées (figure IV.1-6A et -6B).

2. L'anticyclone polaire (AP) est à son tour associé à la masse d'air froid originaire du sud de l'Argentine (masse polaire maritime) (figure IV.1-6B et -6C). Cet anticyclone froid migre fréquemment en direction des basses latitudes, où il rencontre la masse d'air tropical maritime chaud.

La rencontre de ces deux masses d'air génère une zone de basse pression caractérisant un système frontal ou « front froid » (figure IV-6B). Les systèmes frontaux sont formés quand la masse d'air froid venant du sud avance contre la masse d'air chaud des latitudes tropicales. L'air froid, plus dense, pénètre sous l'air chaud, provoquant ainsi son ascension et par conséquent son refroidissement. Une zone de



**Figure IV.1-6 :** A – L’anticyclone subtropical de l’Atlantique Sud (ASA), responsable des vents N et NE (signe de beau temps) ;  
 B – Un système frontal sur le bassin de Campos (orages) ;  
 C – l’anticyclone polaire (AP), responsable des vents de S et SW (chute de température et augmentation des précipitations).



**Figure IV.1-7:** Variation quotidienne du vent sur la côte du Cabo Frio ( $22^{\circ}59'S$ ,  $42^{\circ}02'W$ ), correspondant à une situation préfrontale pendant la période du 16 au 22 janvier 1986. (Franchito *et al.*, 1998)

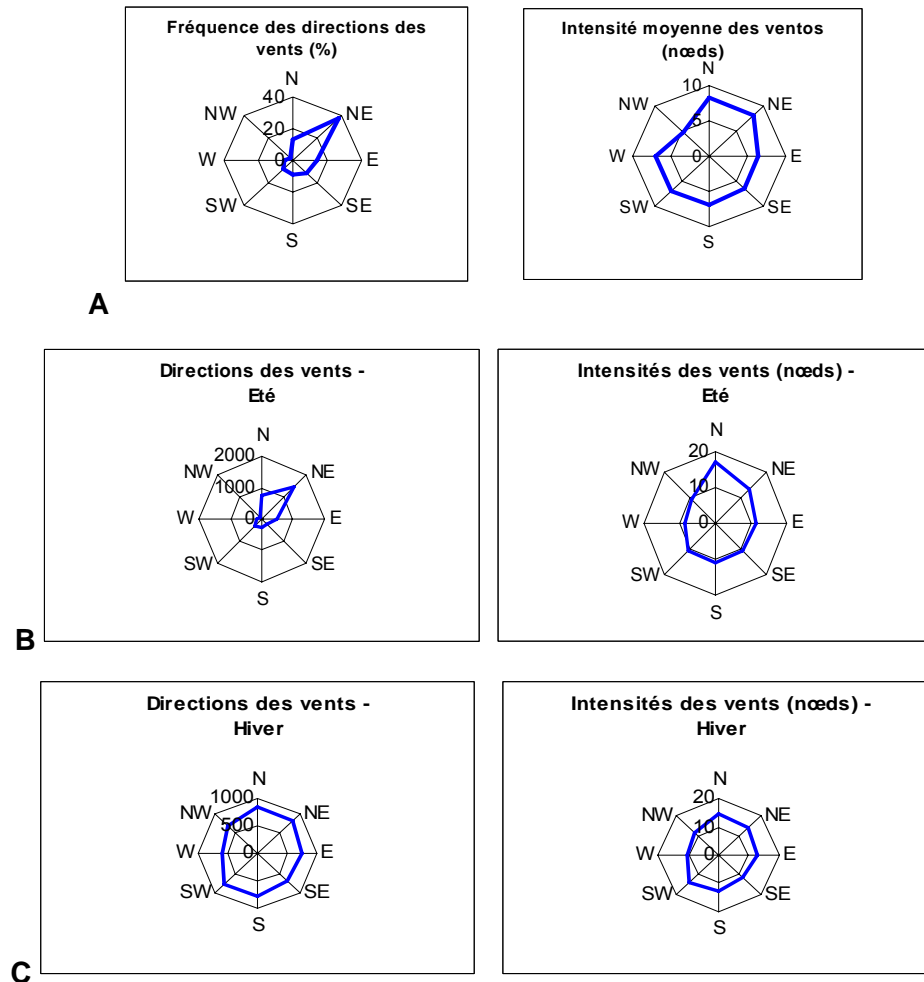
forte activité convective se forme, avec des nuages de type cumulonimbus. Ces nuages provoquent des précipitations orageuses accompagnées d'éclairs, de coups de tonnerre et de fortes rafales de vent en surface. Dans les régions sud sud-est et la partie sud de la région du Nordeste du Brésil, les passages frontaux sont caractérisés par un changement de direction des vents, passant en général de NE à O et tournant à S – SE, à l'origine du mauvais temps. Le retour de l'influence de l'ASA, force les vents à faire chemin inverse (figure IV.1-7).

La répartition annuelle de ces vents varie suivant les saisons (figure IV.1-8A). En période d'été austral (octobre à mars) (figure IV.1-8B), on assiste à une domination nette du régime des vents de direction NE, tandis qu'en hiver il existe une importante alternance de directions (figure IV.1-8C). La rose des vents de la figure IV.1-8A montre que les vents de secteur NE dominent très largement au cours de l'année, le reste du temps, c'est-à-dire lors des passages de fronts froids, soufflent principalement des vents de sud-ouest.

Associée au régime des vents (alizés de NE), la situation géographique du Cabo Frio où la ligne de côte passe brusquement d'une direction NE-SO à E-O est l'un des facteurs primordiaux à l'origine de la formation d'un *upwelling* saisonnier. Cet *upwelling* se déroule en deux phases. Au cours de la période estivale (septembre à avril), (a) sous l'influence des alizés de NE, les eaux chaudes côtières sont repoussées vers le large et les eaux froides de plus de 50 m de profondeur remontent vers la surface sur le plateau continental, et (b) l'éloignement, vers le large, de l'axe du courant chaud du Brésil (CB) (Valentin *op cit.* ; Franchito *et al.*, 1998), et la formation de vortex au niveau d'Abrolhos / chaîne Vitória-Trindade, permettent aux eaux plus froides et plus denses du centre de l'Atlantique Sud (ECAS) de remonter le talus à la base du plateau continental (Moreira da Silva, 1973). D'autres paramètres hydrodynamiques liés à la présence des vortex jouent aussi un rôle important dans l'intensification de cet *upwelling* par accélération de remontées d'eaux plus denses et froides au large du cap São Tomé et du Cabo Frio (Calado *et al.*, 2006 ; Mahiques *et al.*, 2005 ; Campos *et al.*, 2000).

**Tableau IV.1-2** : Distribution des directions et des intensités des vents au cours des années 1987 à 1996, d'après Violante et Carvalho, 1997 *in* {REDEPETRO, 2001}

	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Direction (%)	13,3	37,7	14,0	11,3	9,0	7,7	5,0	2,0
Intensité (m/s)	8,3	8,2	6,4	6,5	6,9	7,0	7,0	4,8



**Figure IV.1-8** : **A** - Distribution moyenne des directions et des intensités des vents, au cours des années 1987 à 1996, d'après Violante - Carvalho (1997) *in* REDEPETRO, (2001) ;  
**B** - pendant la période d'été austral ; 1960 à 1999, et  
**C** - durant les mois d'hiver austral, dans le bassin de Campos; de 1960 à 1999.

**Source:** Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO) – Marine du Brésil (REDEPETRO, 2001).

#### IV.1.4.1. Les variabilités climatiques de l'Atlantique sud

Le climat de la partie SE de l'Amérique du Sud est fortement contrôlé par la Zone de Convergence de l'Atlantique Sud (ZCAS). Elle est caractérisée par une bande nuageuse persistante, d'orientation NW – SE, associée à une zone de convergence dans la basse troposphère (Kousky, 1988) (Figure IV.1-9A). Présente surtout pendant la période estivale, elle s'étend de l'Amazonie jusqu'à l'Atlantique Sud central et son intensité varie considérablement au cours des saisons. Des anomalies de précipitation dans la partie sud / sud-est du Brésil (sécheresses/crues) sont associées à l'intensité (faible/forte) et au positionnement de la ZCAS (nord/sud) (Robertson & Mechoso, 2000 ; Casarin & Kousky, 1986 ; Rocha *et al.*, 1986).

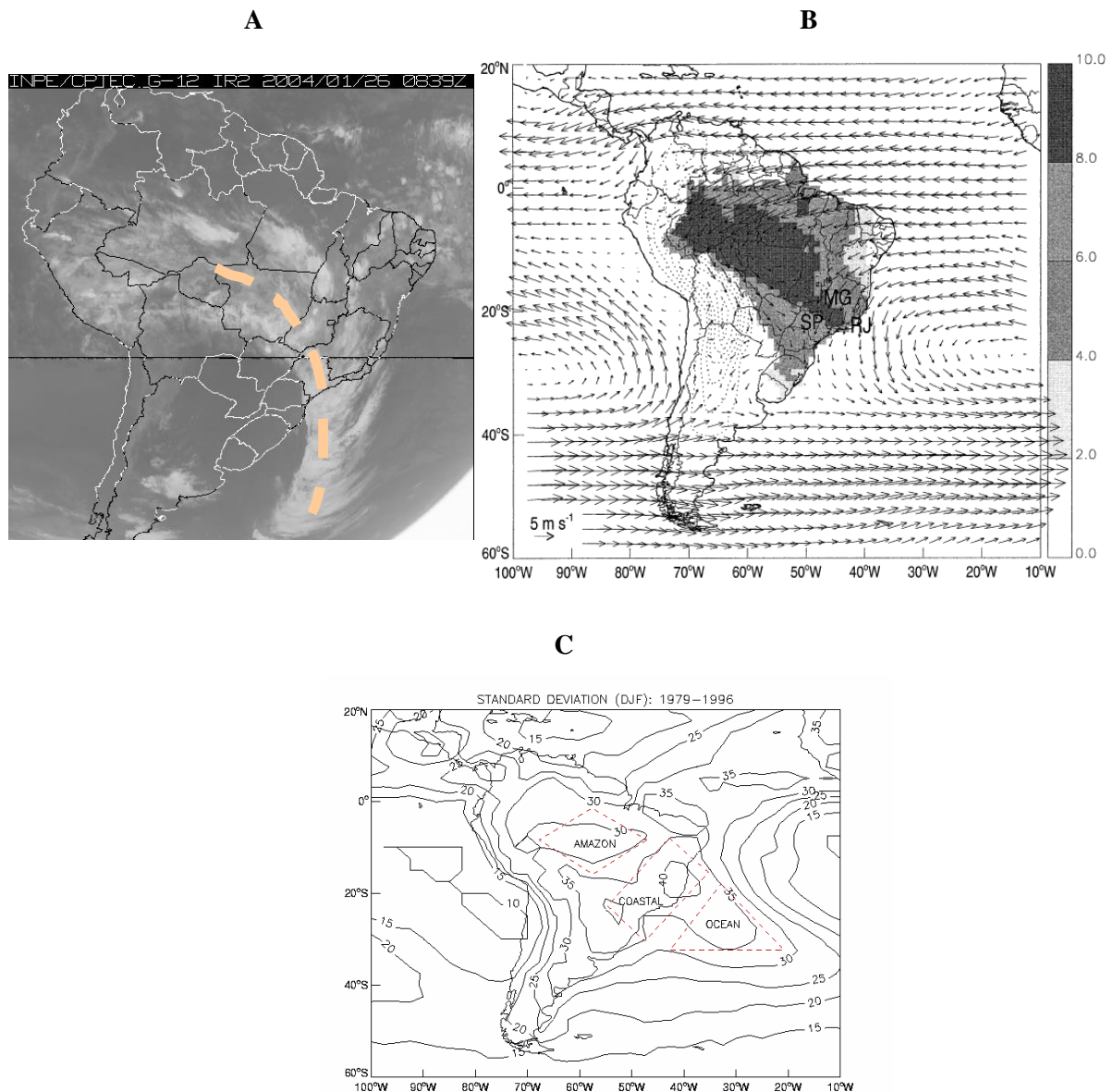
Les mécanismes à l'origine de la ZCAS sont encore méconnus et pas totalement définis ; mais les chercheurs s'entendent néanmoins sur le fait que la convection amazonienne, renforcée par le réchauffement sur le continent, augmente la descente vers le SW de chaleur et d'humidité (Figure IV.1-9A). Guidées par les Andes et le courant de jet subtropical, cette chaleur et cette humidité génèrent des cellules de convection le long de leur parcours vers de plus hautes latitudes. Cette bande convective se fait sentir par les précipitations qu'elle apporte (Figure IV.1-9B).

L'intensité et le positionnement de la ZCAS déterminent le régime des pluies sur les régions centre-est et sud-est du Brésil, y compris les événements pluvieux extrêmes (Carvalho *et al.* 2002 et 2004). Ces mêmes auteurs remarquent que le positionnement de la ZCAS dépend des phases de l'ENSO et que son intensité est liée aux oscillations de Madden-Julian<sup>9</sup> (OMJ). La variabilité de la ZCAS avait déjà fait l'objet de l'étude de Robertson & Mechoso (2000), lesquels ont montré la corrélation interannuelle existant entre la ZCAS et le mode dipolaire nord-sud des anomalies des températures superficielles de la mer (TSM) de l'Atlantique Sud-ouest. La variabilité

---

<sup>9</sup> Oscillation atmosphérique de large échelle dans la région équatoriale, présentant une très haute fréquence de 10 à 90 jours. L'OMJ prend son origine dans l'Océan Indien et voyage vers l'est à  $800 \text{ km} \cdot \text{j}^{-1}$  ( $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Elle est reconnue comme le mode dominant de variabilité intra-saisonnière tropicale (Carvalho *et al.*, 2005 et <http://www.apsru.gov.au/mjo/>).

interdécennale (15 ans) est également à son tour lié aux TSM de l'Atlantique SW, mais surtout aux débits fluviaux, qui montrent aussi un gradient nord-sud.



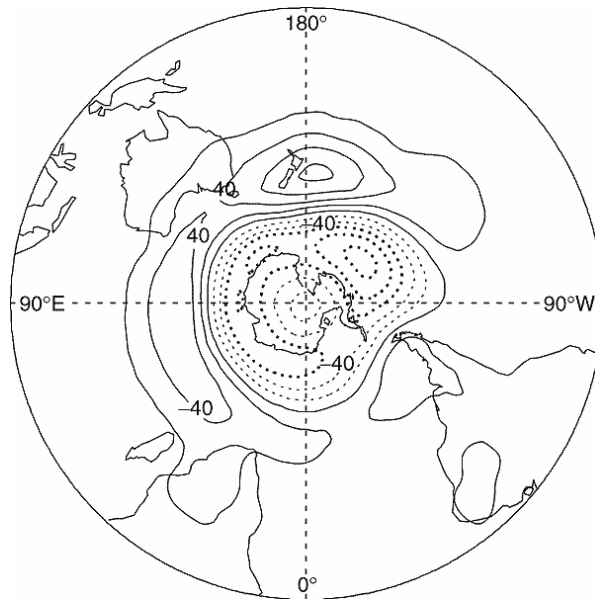
**Figure IV.1-9 :**

- A** – Image satellite montrant la bande convective nuageuse caractéristique de la ZCAS (Source : [http://www.icesb.ucsb.edu/gem/ZCAS\\_leila\\_explanation.ppt](http://www.icesb.ucsb.edu/gem/ZCAS_leila_explanation.ppt)) ;
- B** – Précipitation journalière moyenne ( $1^\circ$  lat-long) sur le Brésil et le régime de vents de basse altitude (850hPa) à partir de réanalyses sur l'Amérique du Sud pour la période de décembre à février.  
Le pointillé représente l'orographie, premier contour et intervalle égal à 500m ; SP – São Paulo ; MG – Minas Gerais ; RJ – Rio de Janeiro (Carvalho *et al*, 2002) ;
- C** – Variabilité espace temporelle de la activité convective estivale sur l'Amérique du Sud (décembre à février) entre 1979-1996, à partir de l'analyse de radiation de ondes longues OLR (« Outgoing Longwave Radiation ») (Carvalho *et al*, 2002)



Wainer & Venegas (2002) ont étudié la variabilité multidéennale de l'Atlantique Sud et ont montré que le mécanisme du signal multidéennal fait appel à des changements d'intensité des « westerlies », associés à des altérations dans l'amplitude de migration vers le sud de l'anticyclone subtropical (qui dirige le transport de masse dans l'océan). Les résultats sont des anomalies de TSM dans l'Atlantique SW subtropical, via l'advection anormale d'eaux froides vers le nord, ou d'eaux chaudes vers le sud, du fait d'un courant des Malouines fort, ou faible. Haarsma *et al.*, (2003) montrent que la ZCIT peut se déplacer vers le sud en réponse à des anomalies déennales de TSM sur l'Atlantique Sud.

Un autre mode de variabilité qui a des conséquences sur l'Amérique du Sud est l'Oscillation Antarctique (OAA) (figure IV.1-10), d'ailleurs peu étudiée. Sa phase positive, qui se caractérise par de basses pressions autour de l'Antarctique, et de hautes pressions aux latitudes moyennes, résulte en un renforcement des vents d'ouest. Ce phénomène s'associe à une plus forte vorticité entourant le pôle, réduisant ainsi les intrusions des masses d'air polaire dans les océans australs. C'est lors de sa phase opposée (négative : pressions plus élevées au pôle et moins élevées aux moyennes latitudes), avec des tourbillons plus faibles, que des manifestations d'air froid antarctique sont le plus susceptibles d'atteindre des zones plus au nord. Carvalho *et al.* (2005) ont analysé les relations de l'OAA avec la zone tropicale, et ils en déduisent que l'alternance des phases de l'OAA semble être liée à la migration latitudinale du courant de jet subtropical troposphérique et à des variations d'intensité du courant de jet polaire. Ceci affecte donc les caractéristiques du cyclone extratropical (origine, jeu des pressions en son centre et propagation vers l'  quateur), et se traduit par l'altération des excursions des cyclones extratropicaux vers les basses latitudes, limitant ainsi la distribution de l'humidité par les fronts froids et l'activité convective.



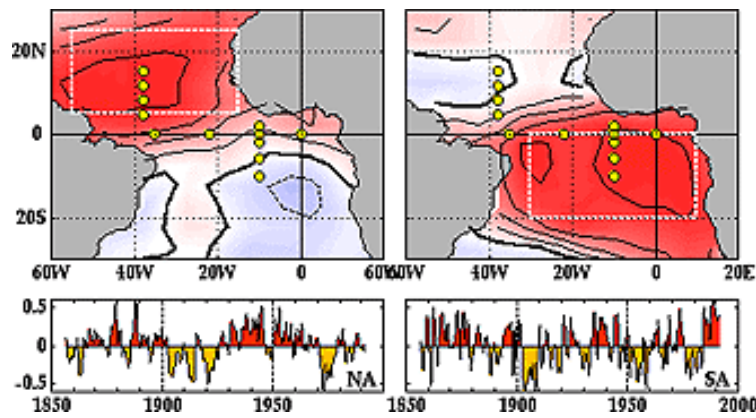
**Figure IV.1-10 :** L'oscillation antarctique.

**Source :** [http://www.grida.no/climate/ipcc\\_tar/wg1/087.htm](http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/087.htm) (Kidson, J.W., 1988: Interannual variations in the Southern Hemisphere circulation. J. Climate, 1, 1177-1198.)

**La Variabilité Atlantique tropicale** (*Tropical Atlantic Variability – TAV*) : La TAV est souvent appelée « *El-Niño* de l'Atlantique », et est associée aux Alizés tout comme El Niño dans le Pacifique. Selon la force des Alizés de Sud-Est, l'eau de l'océan est réchauffée alternativement vers le sud de l'équateur, puis au nord, puis de nouveau au sud de l'équateur (figure IV.1-11). Contrairement à *El-Niño* où l'oscillation va d'ouest en est, celle du TAV va vers le Nord et le Sud. La TAV (Variabilité de l'Atlantique Tropical) désigne les fluctuations de l'ensemble des variations suivantes : celles de la température de la surface des eaux, de la pression du niveau de la mer, de la circulation de Hadley, de la convergence de la zone intertropicale (ZCIT), et des changements de la direction du vent. Sa manifestation la plus claire a lieu en mars, avril et mai habituellement (MAM). Tout ceci est dominé par les changements interannuels et décennaux.

En réponse à l'anomalie des TSM de l'Océan Atlantique tropical une anomalie du vent se développe près de l'équateur, due au gradient de la pression atmosphérique au niveau de la mer. À cause de la force de Coriolis, les vents du sud équatoriaux

évoluent vers des vents de sud-ouest dans l'Atlantique tropical nord (ATN), et de sud-est dans le l'Atlantique tropical sud ATS. Ceci réduit les alizés au nord-est de l'ATN et l'augmente au sud-est de l'ATS. Le flux de chaleur de la surface de l'océan est alors augmenté dans l'hémisphère nord à cause d'une réduction d'évaporation causée par une baisse de la vitesse du vent. Et pour la raison inverse, le flux de chaleur est diminué dans l'hémisphère sud. Alors l'interaction aéronavale instable est opposée par les réactions négatives. Une balance convenable entre les réactions positives et négatives entraîne alors une oscillation d'environ 12-13 ans.

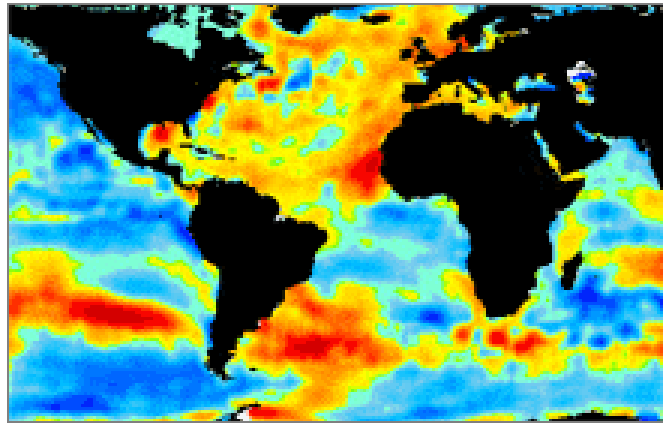


**Figure IV.1-11 :** Les dipôles de températures de surface de l'Océan Atlantique tropical, caractéristiques de la variabilité Atlantique tropicale (TAV).

*L'Oscillation Multidécennale de l'Atlantique* (*Atlantic Multidecadal Oscillation - AMO*): L'AMO est une variation cyclique à grande échelle dans les courants atmosphérique et océanique de l'Océan Atlantique Nord, qui se combinent pour augmenter et baisser alternativement la température de la surface de l'océan Atlantique (TSM) (figure IV.1-12). Cette oscillation multidécennale varie sur une échelle de 50 à 70 ans avec des anomalies positives pendant environ 40 ans, suivies d'anomalies négatives de la TSM pendant environ 20 ans dans l'Atlantique Nord avec une différence d'approximativement 0,6°C entre les extrêmes. L'AMO est un cycle quasi périodique, apparenté à la variabilité de la circulation thermohaline océanique. Son indice montre que de 1856 à 2006 il y a eu alternance de phases chaudes (de 1856 à

1900, de 1930 à 1960, de 1995 à aujourd'hui), et fraîches (de 1900 à 1920, de 1960 à 1995).

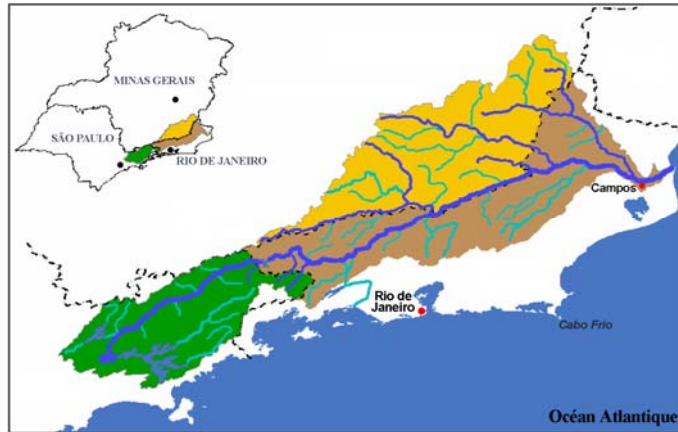
L'indice de l'AMO est calculé en faisant la moyenne de la TSM du nord de l'Océan Atlantique à l'équateur, entre 0°N et 60°N, et entre 75°W et 7,5°W.



**Figure IV.1-12 :** La distribution des températures de surface de l'Océan Atlantique, caractéristiques de l'oscillation multi-décennale de l'Atlantique (AMO).

#### IV.1.5. Apport fluvial à l'Océan

À l'échelle de la côte de l'État de Rio de Janeiro, le fleuve Paraíba do Sul est un important cours d'eau brésilien de taille moyenne (Carvalho, 2005). Son bassin versant se développe sur environ 55 500 km<sup>2</sup>, drainant en partie trois des principaux États brésiliens, ceux de São Paulo, du Minas Gerais et de Rio de Janeiro (figure IV.1-13). Long d'environ 1 150 km, il prend sa source à 1 800 m d'altitude, dans la Serra da Bocaina à l'extrême est de l'État de São Paulo, traverse d'est en ouest la vallée située entre la Serra do Mar et la Serra da Mantiqueira parallèlement à la côte, dans l'un des reliefs les plus accidentés du Brésil, et se jette à la mer près de la ville de Campos au nord de l'État de Rio de Janeiro.

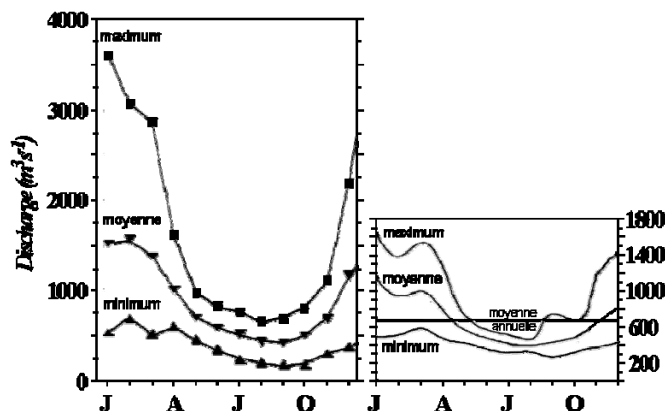


**Figure IV.1-13 :** Bassin-versant du Paraíba do Sul, d'après ANA (2004).

**Source :** <http://www.ana.gov.br/bibliotecavirtual/arquivos/BoletimANAPBSul-ago2004.pdf> (27/07/2007)

La quasi-totalité du bassin versant était couverte par la forêt Atlantique (forêt tropicale humide), avant d'être pratiquement totalement défrichée à partir du XVIII<sup>ème</sup> siècle. Dans la partie sud, une forêt ombrophile se développe, sous l'influence d'un climat plus humide, pendant que dans la partie plus au nord une forêt saisonnière s'installe sous un climat plus sec, avec des périodes sèches bien prononcées durant les mois d'hiver (juillet à septembre).

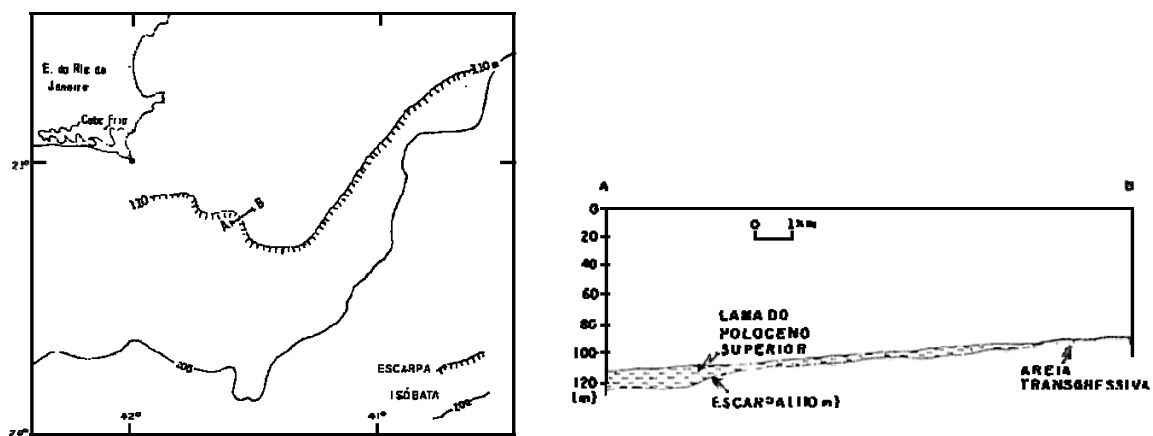
Le débit actuel moyen annuel du Paraíba do Sul (figure IV.1-14) est d'environ  $670 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , avec des extrêmes saisonniers variant entre 300 et  $1650 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Les mois d'hiver (juillet-septembre) correspondent au débit minimal et à la saison d'été (janvier-mars) correspond un maximum d'écoulement.



**Figure IV.1-14 :** Débit mensuel du fleuve Paraíba do Sul, à gauche pour la période 1934-1978 (Carvalho, 2002) et à droite pour la période 1989-1996 (Muehe, 1998).

### IV.1.6. Sédimentologie

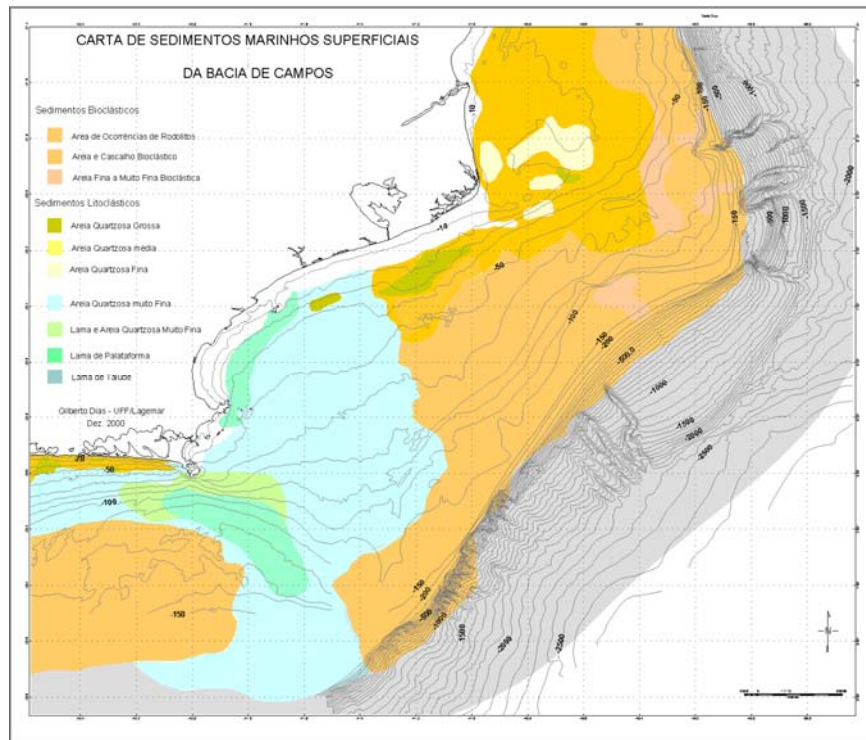
Les variations du niveau marin ont dû avoir une influence importante sur la distribution passée et actuelle des sédiments de la plateforme. Ceux de la bordure de plateforme, par exemple, ont été déposés et remaniés lors des périodes de bas niveau de la mer. Sur la plateforme moyenne, on note de nombreux corps sédimentaires reliquats de ces fluctuations. Tout le long de la côte brésilienne, il est important de noter la présence d'un escarpement à 110 m de profondeur correspondant à l'empreinte des fluctuations du niveau de la mer lors du dernier maximum glaciaire. Au large du Cabo Frio cet escarpement est daté de 13 000 ans par Kowsmann & Costa (1979), figure IV.1-15.



**Figure IV.1-15 :** Paléo-ligne de rivage datant d'environ 13 000 ans BP, au large du Cabo Frio. Présenté par Kowsmann *et al.* (1979).

Les études réalisées par Dias *et al.*, (2000), fondées sur la composition des sédiments superficiels (figure IV.1-16), ont montré qu'en général la région au nord du Cabo Frio est dominée par des carbonates biogéniques, surtout au niveau de la bordure de la plateforme, tandis que les sables plus grossiers d'origine fluviale tapissent la

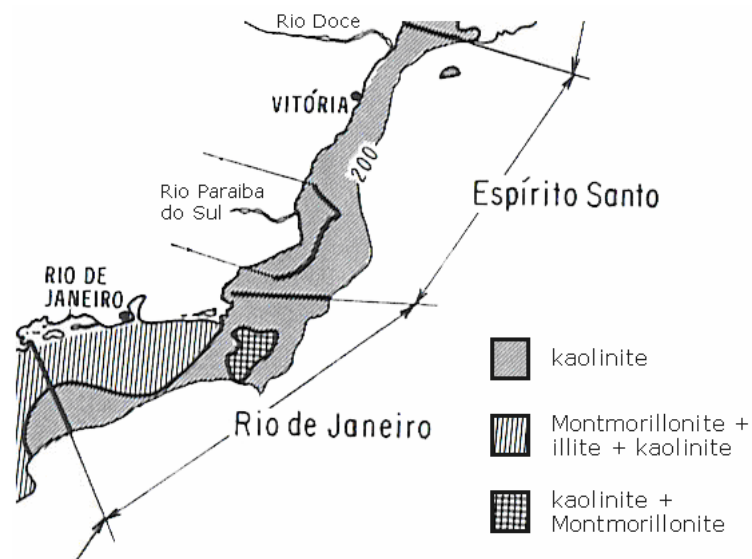
plateforme interne. Au large du Cabo Frio, cette distribution est généralement dominée par des sables plus fins et met en évidence un corps vaseux, constitué par des argiles (20 - 40%) et des teneurs croissantes de silt en direction des zones plus profondes (Dias *et al.*, 1982 ; REDEPETRO, 2001).



**Figure IV.1-16 :** Carte de distribution des sédiments superficiels de la plateforme continentale entre le *Rio Doce* et la *Região dos Lagos* (région des lagunes côtières), d'après Dias *et al.* (1982).

Une étude des argiles de la plateforme, réalisée à large échelle dans le cadre du projet *Reconhecimento da margem continental Brasileira* - REMAC et localement par Dias *et al.*, (2000), a mis en évidence qu'au niveau du Cabo Frio les argiles changent de composition, séparant ainsi les provinces sédimentologiques de l'Espírito Santo et de Rio de Janeiro (figure IV.1-17). La province de l'Espírito Santo est dominée par la Kaolinite, par opposition à une composition plus hétérogène représentée par un

mélange de montmorillonite, illite et kaolinite dans la partie sud (province de Rio de Janeiro). Au large du Cabo Frio, on note la présence d'une poche isolée de kaolinite/montmorillonite probablement liée aux influences nord et sud respectivement du fleuve Paraíba do Sul et de la Baie de Guanabara, mais aussi accentuée par la circulation côtière.



**Figure IV.1-17 :** Minéralogie des argiles de la couverture sédimentaire superficielle de la plateforme continentale SE Brésilienne, selon Kowsmann *et al.* (1979).





## ***IV.2. Résultats***

### **IV.2.1 Prélèvement de la colonne sédimentaire**

La carotte CF02-02A a été prélevée à environ 20 miles marins au SE de l'île de Cabo Frio (23° 16' 00" S, 41° 48' 02" W), sous une tranche d'eau de 124 m, et à l'aide d'un carottier à piston de type Külenberg de 3 mètres de long et 7 cm de diamètre interne (figure IV.2-1). L'opération, qui a eu lieu le 15/08/2002, a été réalisée avec la collaboration de chercheurs et étudiants du département d'Océanographie de l'Université de l'État de Rio de Janeiro (UERJ<sup>10</sup>) et grâce à l'appui logistique de la PETROBRAS (Petróleo Brasileiro S.A.) qui a mis à disposition son navire océanographique, le PSV\* Astro Garoupa. (\* « platform supply vessel »).

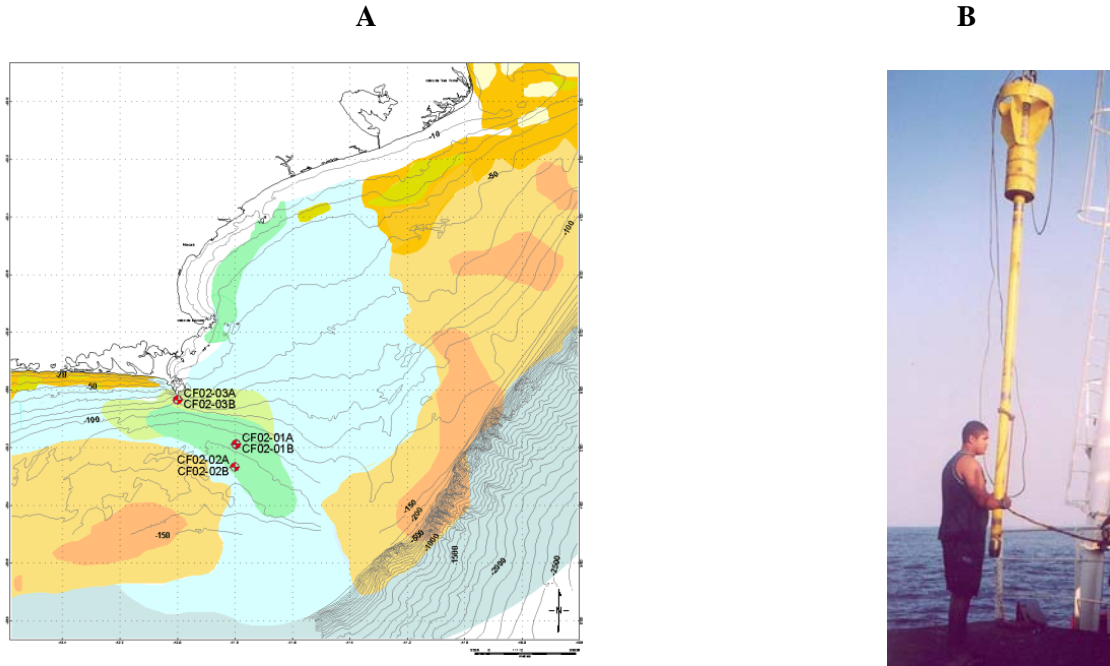
À bord, la carotte a été découpée en sections de  $\approx 1$  mètre de longueur conditionnées dans la chambre froide du navire. Une fois à terre, les tubes ont été stockés temporairement au Département de Géochimie de l'Université Fédérale Fluminense (Niterói – Rio de Janeiro) pour ensuite être envoyés au Centre de l'IRD d'Île-de-France, à Bondy, où ils ont été stockés en chambre froide. En 2004, l'ouverture des carottes a eu lieu au laboratoire de sédimentologie de l'UMR EPOC<sup>11</sup> (5805 CNRS) de l'Université de Bordeaux, où les carottes ont été radiographiées.

Après ouverture, une moitié de carotte a été archivée à Bondy, et l'autre moitié a été sous-échantillonnée en tranches de 1 centimètre d'épaisseur. Les sédiments ainsi obtenus ont été séchés en étuve à 40-50°C, broyés en mortier d'agate et conditionnés en sachets plastiques.

---

<sup>10</sup> Universidade do Estado do Rio de Janeiro

<sup>11</sup> Environnements et Paléoenvironnements OCéaniques (UMR 5805 CNRS/Université de Bordeaux I)



**Figure IV.2-1 : A** – Position de la carotte CF02-02A par rapport à la distribution des faciès sédimentaires superficiels de la plateforme continentale de la région comprise entre le Cabo Frio et le Cabo de São Tomé.  
**B** – Le carottier utilisé lors de campagne en mer.

Obs. : 1 – Les autres points représentés sur la figure 1A correspondent à d’autres carottes prélevées lors de la même campagne.  
2 – Cette figure 1A est géoréférencée et a été créée à partir de la figure IV.1-16 (page 79 – REDEPETRO, 2000), à l’aide du logiciel Geosoft®.

## IV.2.2 Caractéristiques lithologiques

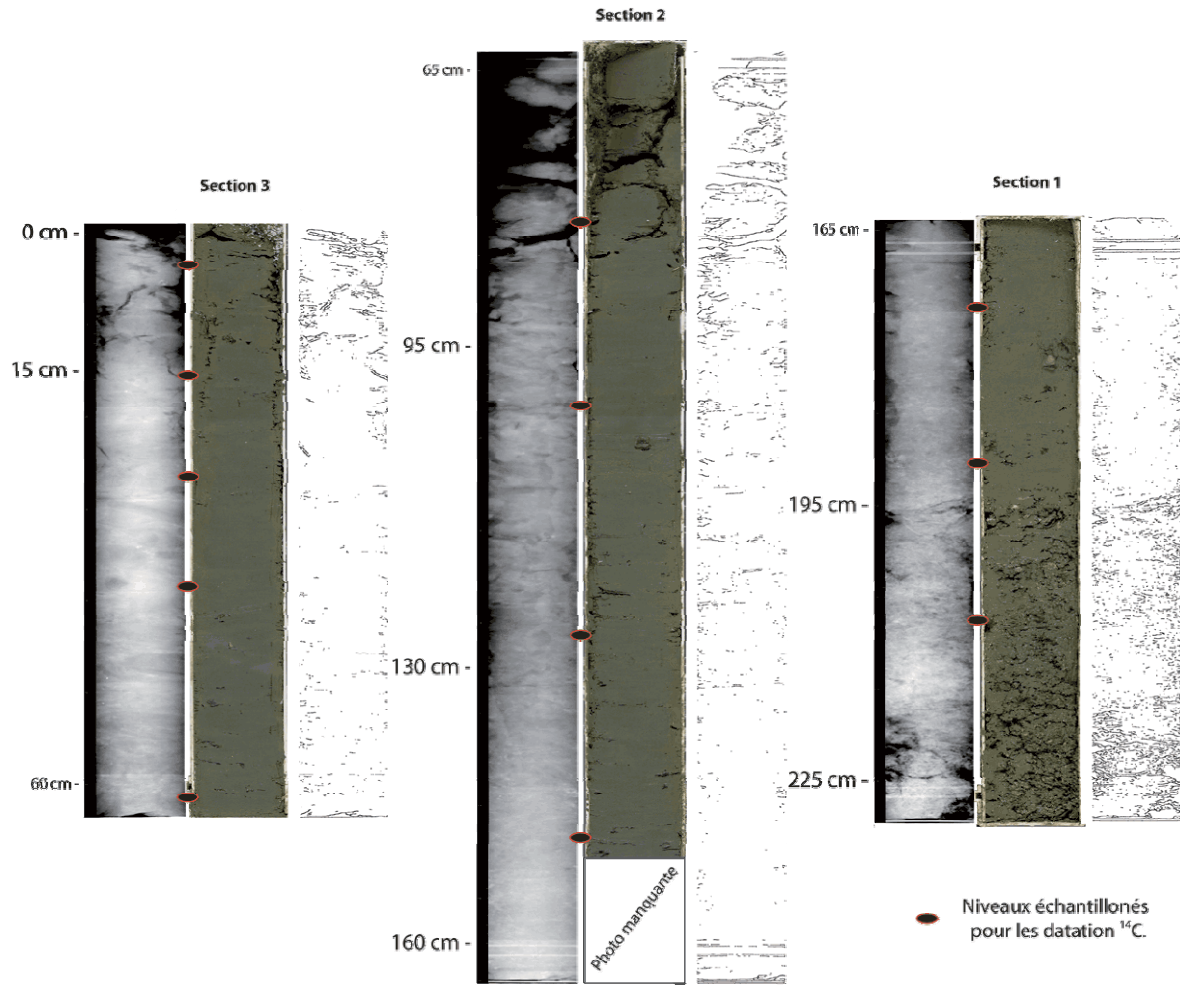
### IV.2.2.1. Analyses radioscopiques

Les caractéristiques lithologiques déduites des images radioscopiques de haute résolution obtenues par système SCOPIX, le profil en niveaux de gris, et la densité de la carotte, sont présentés dans les figures IV.2-2 et IV.2-3. Il faut rappeler que les analyses SCOPIX sur les sections de la carotte CF02-02A ont été réalisées directement sur des demi-carottes : les plaquettes habituellement employées pour ces analyses n’ont pas pu être réalisées car le tube utilisé pour le carottage possédait un diamètre inférieur (7 cm) à la largeur des plaquettes (10 cm). De ce fait, seules les valeurs de niveaux de

gris calculées sur la ligne centrale de la carotte ont été utilisées, pour éviter tout effet de bord provoqué par la courbure du tube. Les images radioscopiques, appuyées par l'observation macroscopique, montrent des niveaux plus denses, détritiques, riches en débris carbonatés, à la base, évoluant vers des niveaux moins denses, argilo-organiques, au sommet. Lors de l'ouverture la carotte présentait des couleurs allant du gris foncé à la base au gris verdâtre au sommet, qui d'après le nuancier de couleurs de Munsell correspondent aux codes 5GY-4/1 et 5G-4/2, respectivement. La variation des niveaux de gris confirme l'observation lithologique, avec des valeurs élevées à la base diminuant vers le sommet de la carotte. Leur variation permet de mettre en évidence six unités distinctes :

- **Unité I** (228 -195 cm) : détritique riche en débris carbonatés biogènes denses (valeurs élevées de niveaux de gris) et grossiers ;
- **Unité II** (195 -160 cm) : sablo-argileuse carbonatée (densité élevée stable) ;
- **Unité III** (160 -130 cm) : silto-argileuse carbonatée (densité décroissante) ;
- **Unité IV** (130 - 95 cm) : silto-argileuse homogène (moins dense) ;
- **Unité V** (95-15cm) : silto-argileuse sombre homogène (densité croissante) ;
- **Unité VI** (15 - 0 cm) : silto-argileuse homogène (moins dense).

Le traitement des images SCOPIX, suivant la méthodologie décrite par Lofi & Weber (2001) qui permet la mise en évidence des structures sédimentaires, montre que la carotte CF02-02A est totalement homogène (figure IV.2-2). La seule structure réelle qui apparaît après le traitement, se situe à 195 cm : il s'agit de la transition entre la zone détritique grossière à la base de la carotte, et le début de la sédimentation fine silto-argileuse. Les autres structures qui apparaissent sont des artefacts correspondant à des zones de dessèchement aux extrémités et sur les bords des tubes. Cette homogénéité de la carotte n'est pas étonnante car, même si elle a été prélevée sous une zone d'*upwelling*, l'oxygénation constante de la colonne d'eau jusqu'au fond ne favorise pas l'occurrence de laminations. Des signes de congélation de la carotte ont été observés lors de l'ouverture, ce qui a pu survenir soit lors du stockage temporaire à Rio de



**Figure IV.2-2 :** Images radioscopiques (SCOPIX), photos et images radioscopiques traitées, des sections de la carotte CF02-02A.

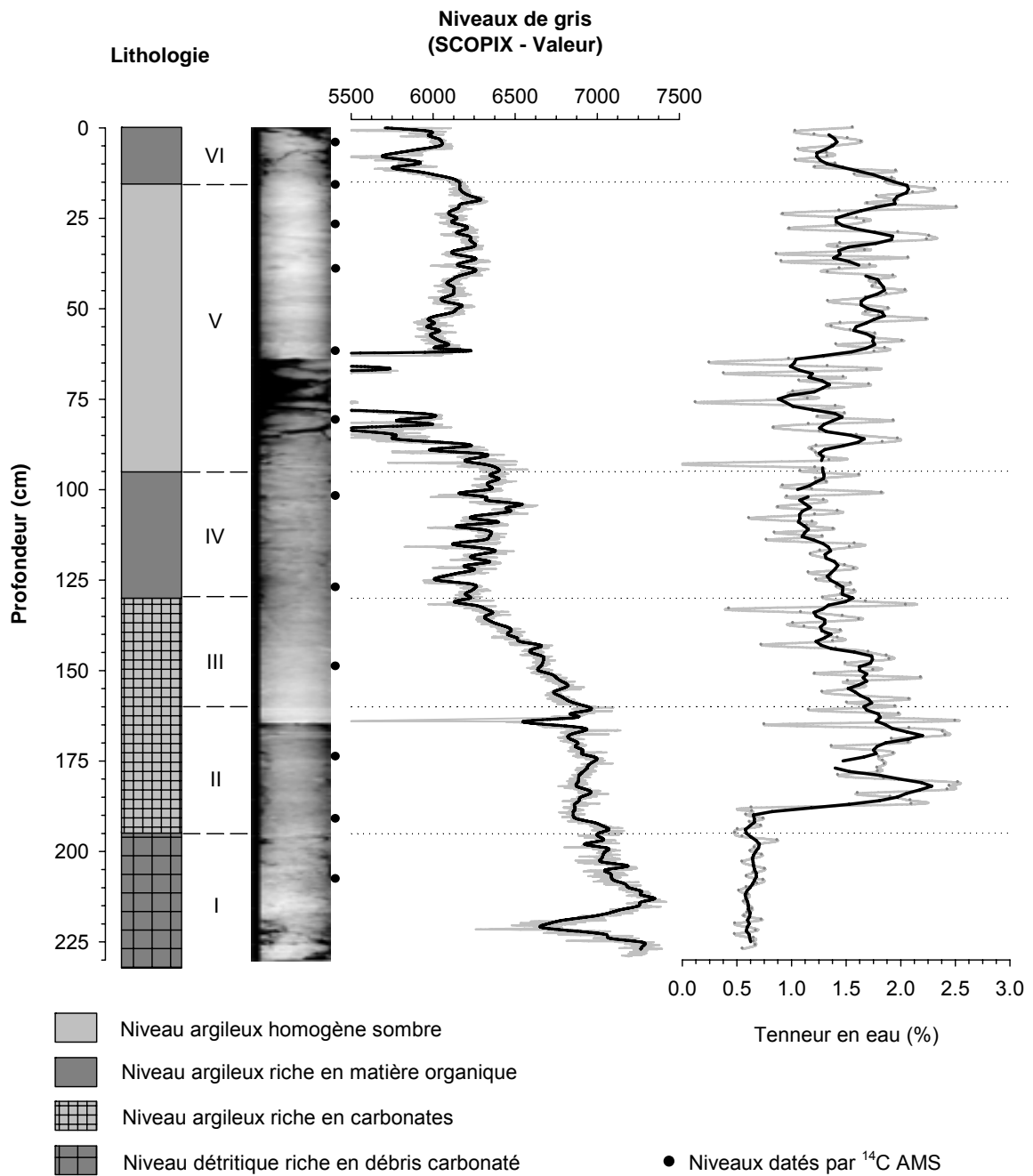
Janeiro, soit lors du transport en soute dans l'avion, ce qui n'est pas favorable à la préservation des structures fines. Aucun signe de transport latéral énergétique par courants de fond capables de causer une érosion ou d'apporter du matériel plus grossier, ne semble exister. Comme la carotte a été prélevée près du bord du corps sédimentaire de granulométrie fine (figure IV.2-1) et que ce corps est entouré de sédiments de granulométrie plus élevée, on pouvait s'attendre à ce que ces types d'événements (s'ils existent) se traduisent par des lentilles sableuses, visibles à l'œil nu ou par l'imagerie aux rayons X.

Il semble que la méthode de détermination de la densité des sédiments de la carotte CF02-02A n'aie pas été la plus adaptée, au vu de la grande variabilité des données (figure IV.2-3). Néanmoins, de façon générale les valeurs sont en accord avec les tendances des valeurs dérivées de l'analyse SCOPIX, et aussi bien avec les valeurs de densité mesurées sur la carotte jumelle CF02-02B par Da Silva (2004), toutes proportions étant gardées sur la résolution de l'analyse SCOPIX de 0,012 cm, par rapport à la résolution de mesure de la densité de 1 cm. Les densités mesurées de la base détritique (228 – 190 cm) à leur tour, ne sont pas en accord, ni avec les données SCOPIX, ni avec les données obtenues par Da Silva (2004), sur ces échantillons composés de débris carbonatés grossiers. La méthode employée ne permet pas de rendre compte de la réalité de cette unité lithologique.

### IV.2.2.2. Chronologie et taux de sédimentation

Au total, 12 datations radiocarbone ont été réalisées sur de la matière organique totale. Les âges obtenus sont en accord avec ceux publiés dans la région (Kowsmann & Costa, 1979 ; Dias *et al.*, 1982 ; Mahiques *et al.*, 2004 ; Mahiques *et al.*, 2007). Il est à noter qu'une partie du sommet de la carotte, correspondant aux derniers 2000 ans, a été perdue lors du carottage.

Les âges  $^{14}\text{C}$  BP ont été calibrés en tenant compte de la correction de l'effet réservoir ( $\Delta R$ ) régional proposée par Angulo *et al.* (2005) :  $\Delta R = 8 \pm 17$  pour le XX<sup>ème</sup> siècle (Tableau IV.2-1, figure IV.2-4). Angulo *et al.* (2007) ont essayé de mieux connaître l'influence de l'*upwelling* sur l'effet réservoir de la côte SE du Brésil par l'étude des sites coquilliers préhistoriques, mais sans succès. Le  $\Delta R$  proposé par Angulo *et al.* (2005) est similaire à celui proposé par la base de données de correction de l'effet réservoir marin (<http://calib.qub.ac.uk/marine>) pour la côte SE du Brésil, soit  $\Delta R = -10 \pm 48$  (voir en annexe les données et le calcul). La différence entre les âges calibrés avec ces deux corrections est de seulement 33 ans en moyenne. L'effet réservoir a dû très certainement varier au cours du temps, mais faute de données régionales



**Figure IV.2-3 : Lithologie, niveaux de gris (SCOPIX) et densité de la carotte CF02-02A**

indicatives de ces changements, nous avons employé la même correction tout au long de la carotte (correction d'Angulo). L'autre facteur qui affecte la calibration des âges  $^{14}\text{C}$  est l'origine marine ou terrestre du matériel daté, dans ce cas la matière organique sédimentaire totale. En cas de mélange entre des matériels de différentes origines, les proportions de chacune sont importantes à connaître. Nous avons cependant choisi de considérer que la matière organique sédimentaire totale avait une origine 100% marine pour la calibration, faute d'un marqueur robuste de proportionnalité.

**Tableau IV.2-1** : Résultats des datations radiocarbone réalisées au LMC14 ;

Référence de l'échantillon	Numéro de la cible	Nature	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	Âge $^{14}\text{C}$ BP	Âge $^{14}\text{C}$ cal BP		
					Prob.Max.**	-2 $\sigma$	+2 $\sigma$
<b>CF02-02A (3-4)cm</b>	SacA 7654	MOT*	-9,20	<b>2495</b> $\pm$ 30	<b>2164</b>	<b>-75</b>	<b>+125</b>
<b>CF02-02A (15-16)cm</b>	SacA 7655	MOT	-7,60	<b>3325</b> $\pm$ 30	<b>3165</b>	<b>-95</b>	<b>+85</b>
<b>CF02-02A (26-27)cm</b>	SacA 6787	MOT	-22.65	<b>3150</b> $\pm$ 30	<b>2924</b>	<b>-70</b>	<b>+95</b>
<b>CF02-02A (38-39)cm</b>	SacA 6788	MOT	-21.55	<b>3000</b> $\pm$ 30	<b>2769</b>	<b>-35</b>	<b>+70</b>
<b>CF02-02A (61-62)cm</b>	SacA 6789	MOT	-21.40	<b>4580</b> $\pm$ 70	<b>4776</b>	<b>-100</b>	<b>+30</b>
<b>CF02-02A (80-81)cm</b>	SacA 6790	MOT	-23.20	<b>4790</b> $\pm$ 50	<b>5074</b>	<b>-80</b>	<b>+165</b>
<b>CF02-02A (101-102)cm</b>	SacA 6791	MOT	-22.20	<b>5910</b> $\pm$ 40	<b>6325</b>	<b>-30</b>	<b>+80</b>
<b>CF02-02A (126-127)cm</b>	SacA 6792	MOT	-22.00	<b>7530</b> $\pm$ 45	<b>7979</b>	<b>-45</b>	<b>+65</b>
<b>CF02-02A (148-149)cm</b>	SacA 6793	MOT	-18.50	<b>8385</b> $\pm$ 45	<b>8975</b>	<b>-80</b>	<b>+70</b>
<b>CF02-02A (173-174)cm</b>	SacA 6794	MOT	-21.90	<b>9370</b> $\pm$ 50	<b>10200</b>	<b>-40</b>	<b>+40</b>
<b>CF02-02A (190-191)cm</b>	SacA 6795	MOT	-21.40	<b>9820</b> $\pm$ 60	<b>10663</b>	<b>-60</b>	<b>+110</b>
<b>CF02-02A (207-208)cm</b>	SacA 6796	MOT	-25.70	<b>10 500</b> $\pm$ 60	<b>11625</b>	<b>-300</b>	<b>+150</b>

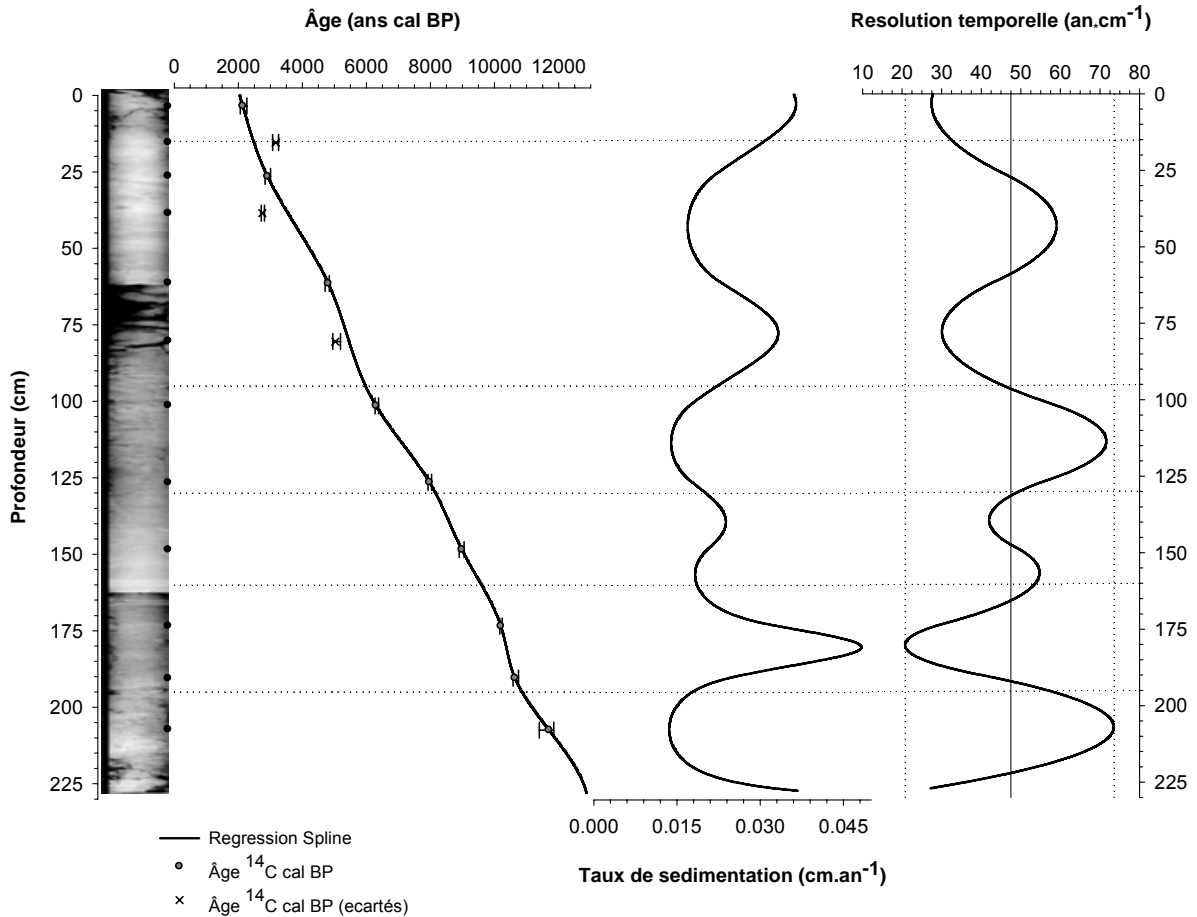
\*MOT – matière organique totale

\*\*Prob.Max – âge le plus probable

La régression « spline » est employée par souci d'harmonisation méthodologique, car d'une part cette méthode peut parfois exprimer mieux les variations naturelles du milieu, et d'autre part, c'est la méthode employée pour établir le contrôle chronologique des autres carottes du même site étudiées dans le cadre des



thèses de Laslandes (2007) ; Michelle Morata de Andrade<sup>12</sup> et Alice Cruz Candido da Silva<sup>2</sup>. Pour les extrémités des carottes ces calculs doivent être maniés avec précaution, car les extrapolations de la méthode « *spline* », peuvent générer de fausses situations par exagération, surtout à la base (Figure IV.2-4).



**Figure IV.2-4 :** Chronologie, taux de sédimentations et résolution temporelle de l'échantillonnage de la carotte CF02-02A.

Trois âges obtenus par datation <sup>14</sup>C AMS n'ont pas été utilisés dans le calcul du modèle chronologique (15,5 cm – 3 170 ans cal BP ; 38,5 cm – 2 750 ans cal BP ; et 80,5 cm – 5 030 ans cal BP) (figure IV.2-4). Le dernier se rencontrait dans une grande zone de dessèchement (figure IV.2-4), ce qui amenait des incertitudes quant à la

<sup>12</sup> Thèses en voie de soutenance au sein du « Programa de Pós-Graduação em Geoquímica Ambiental de l'Universidade Federal Fluminense », Ville de Niterói, Etat de Rio de Janeiro, Brésil.

profondeur réelle et la possibilité de mélange dû au transport de la carotte. La tendance globale des échantillons de la partie basale de la carotte est à une légère accélération de la sédimentation entre 120 cm et 75 cm, montrés par les échantillons 80,5 et 101,5 cm. Cette accélération est interrompue autour de 60 cm, mais reprend ensuite jusqu'au sommet de la carotte. Entre 40 et 15 cm on note une inversion des âges (l'échantillon de 38,5 cm présente un rajeunissement, tandis que celui à 15,5 cm montre au contraire un vieillissement). Ceci peut être dû à des origines différentes de la matière organique entre les échantillons ou alors à un effet de l'*upwelling*. Ce type de phénomène survient quand les eaux plus profondes, portant généralement du carbone plus âgé que le carbone de l'atmosphère, sont pompées vers la surface par l'*upwelling*, générant une forte productivité. Or cette productivité se sert du CO<sub>2</sub> dissout des eaux de l'*upwelling* pour réaliser la photosynthèse, la matière produite alors est ainsi enrichie en carbone plus âgé. Un *upwelling* renforcé au cours du temps peut ainsi augmenter le flux de matériel portant du carbone plus âgé vers les sédiments, vieillissant ainsi le registre. Ce point est détaillé plus amplement dans la section dédiée aux résultats des analyses moléculaires.

La distribution des âges en fonction de la profondeur montre quant à elle une sédimentation continue depuis  $\approx 12\,000$  ans cal BP et jusqu'à  $\approx 2\,000$  ans cal BP, et met en évidence des taux de sédimentation variables. Les taux de sédimentation varient entre 0,014 et 0,048 cm\*an<sup>-1</sup>. De la base et jusqu'à 100 cm, les taux de sédimentation sont stables autour de 0,02 cm\*an<sup>-1</sup> avec une petite amplitude et une légère augmentation atteignant des valeurs proches de 0,05 cm\*an<sup>-1</sup> autour de 180 cm. Au-delà des 90 cm, on note une augmentation de l'amplitude de variation et des taux de sédimentation vers le sommet, où ils atteignent des valeurs de 0,035 cm\* an<sup>-1</sup>. Les taux de sédimentation, et en conséquence la résolution temporelle, entre la base et  $\approx 210$  cm et entre  $\approx 3$  cm et le sommet, sont vraisemblablement faux, fruit des amplifications de la régression *spline*.

La résolution temporelle de l'échantillonnage enfin, estimée à partir du modèle chronologique, varie de 21 à 74 ans\*cm<sup>-1</sup> avec une moyenne autour de 47 ans\*cm<sup>-1</sup>. Ces résolutions, fonction du pas d'échantillonnage adopté lors du découpage de la carotte,

permettent de documenter seulement les variabilités multi-décennales à séculaires le long de la carotte. Néanmoins, la variabilité décennale peut-être mieux étayée pour les 4000 dernières années.

**Tableau IV-2.2 :** Descriptif statistique des taux de sédimentation et de la résolution temporelle en fonction des unités lithologiques de la carotte CF02-02A

		Moyenne	Maximum	Minimum	Ecart-type
Unité VI	TS	0,035	0,036	0,032	0,001
	RT	28,4	30,9	27,4	1,13
Unité V	TS	0,024	0,033	0,017	0,006
	RT	43,6	59,0	30,1	10,39
Unité IV	TS	0,016	0,023	0,014	0,003
	RT	62,2	71,6	43,3	8,61
Unité III	TS	0,021	0,024	0,018	0,002
	RT	47,7	54,7	42,0	4,67
Unité II	TS	0,031	0,048	0,018	0,010
	RT	36,2	54,2	20,7	11,70
Unité I	TS	0,017	0,037	0,014	0,005
	RT	60,9	73,5	27,2	12,93

**TS** - Taux de sédimentation (cm\*an<sup>-1</sup>)  
**RT** - Résolution temporelle (an\*cm<sup>-1</sup>)

### IV.2.3 Analyses élémentaires

La variation du carbone total (CT) et du carbone organique total (COT) obtenus respectivement par l'analyse élémentaire et par pyrolyse Rock-Eval 6, ainsi que du rapport C:N ( $C_{\text{organique}} / N_{\text{total}}$ , exprimé en fonction de leurs poids atomiques) sont en parfaite cohérence avec la lithologie et définissent aussi 6 unités lithologiques de bas en haut (figure IV.2-5, tableau IV.2-3).

- **Unité I** (228 - 195 cm ; 12 870 - 10 860 ans cal BP) : cette unité est caractérisée par des valeurs élevées de CT (10%) à la base diminuant vers le sommet où elles atteignent 6%. Par ailleurs, le carbone organique total (COT) affiche plutôt de faibles valeurs variant autour 0,2%, tandis que le C:N montre des valeurs de 25 à la base de cette unité, diminue rapidement pour atteindre des valeurs de 10 au milieu, et reste stable

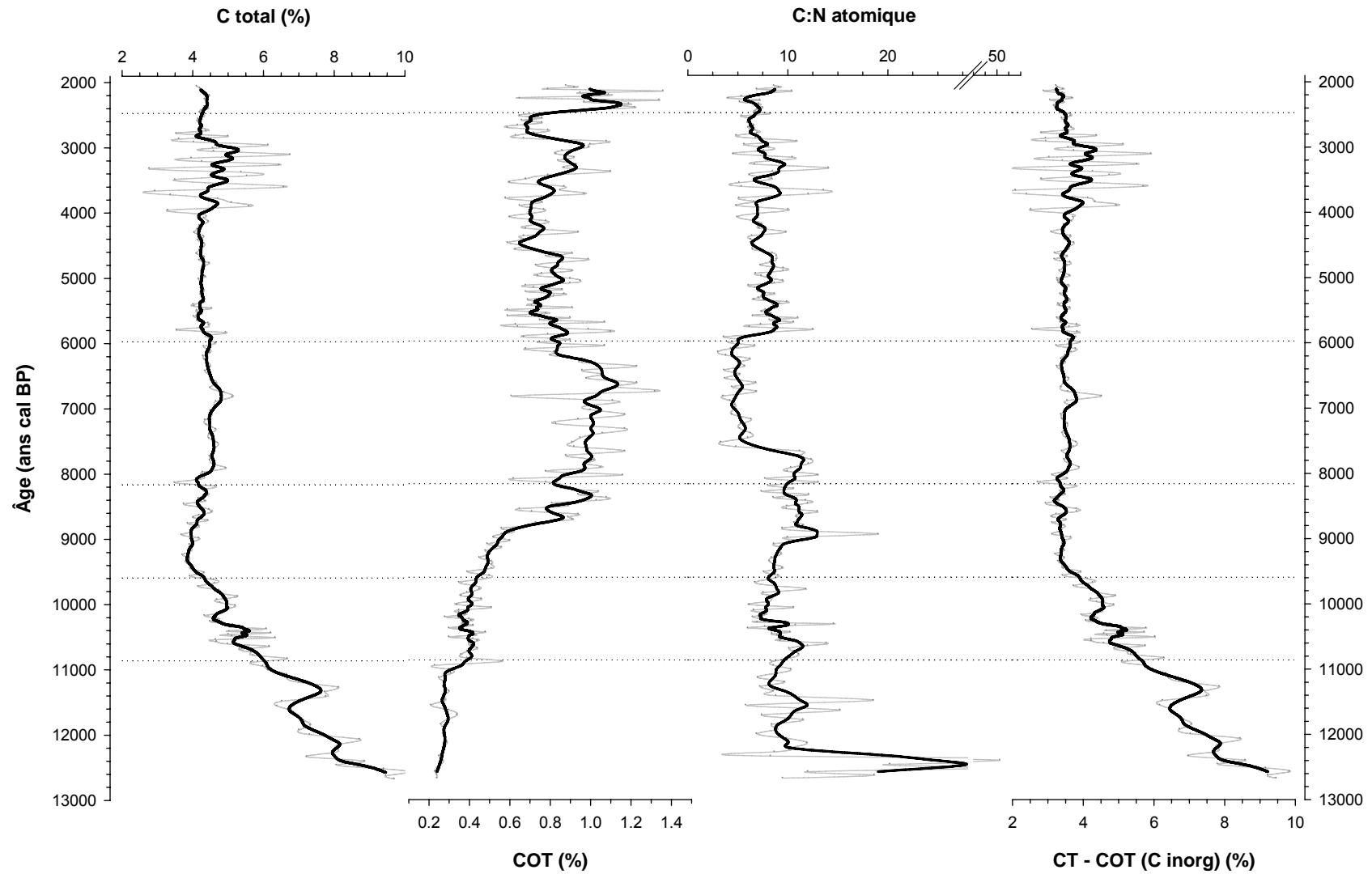
jusqu'au sommet de cette Unité. La différence entre le CT et le COT montre bien le caractère carbonaté des sédiments qui la composent et le C:N élevé indique l'influence des plantes terrestres.

- **Unité II** (195 - 160 cm ; 10 860 - 9 590 ans cal BP) : la tendance décroissante du CT continue progressivement dans cette unité comme dans l'unité antérieure (de 6 à 4%). Le COT présente une légère augmentation et se maintient, variant autour de 0,4%, tout au long de l'unité. Le C:N diminue jusqu'au centre de l'unité (de 11 à 7%) pour ensuite amorcer une tendance à l'augmentation (8% au sommet de l'unité). Le caractère carbonaté est encore persistant dans cette unité même si cela est moins remarquable à l'inspection visuelle, tandis que le C:N retrouve des valeurs compatibles avec l'environnement marin.
- **Unité III** (160 - 130 cm ; 9 590 - 8 160 ans cal BP) : elle est marquée par l'inflexion de la tendance de diminution du CT vers une très légère augmentation vers le sommet, de 3,5 à 4,5%. Le COT affiche une nette augmentation des valeurs de 0,4 à 1,0%. Le rapport C:N, dans cette unité, continue la tendance amorcée dans l'unité précédente (de 8 à 12%). Ceci marque le début d'une sédimentation organique importante.
- **Unité IV** (130 - 95 cm ; 8 160 - 5 970 ans cal BP) : elle est caractérisée par une stabilité des valeurs du CT autour de 4% accompagnée d'une augmentation importante des valeurs du COT variant autour de 1% et d'une diminution brusque des valeurs du rapport C:N variant autour de 5. Dans cette unité le COT retrouve son expression maximale. La réduction importante du rapport C:N est due à une importante augmentation de la teneur en azote.

- **Unité V** (95 - 15 cm ; 5 970 - 2 470 ans cal BP) : à la base de cette unité, les valeurs de COT diminuent et se stabilisent autour de 0,7%. Cette diminution est accompagnée par une ré-augmentation du C:N (le N retrouve les teneurs de l'unité III) pour atteindre des valeurs de 10 alors que les valeurs du CT restent inchangées. La variation du COT montre un comportement cyclique : il tend à augmenter entre 5 600 et 4 800 ans cal BP, se réduit brusquement, reprend une augmentation progressive entre 4 600 et 3 000 et subit à nouveau une brusque réduction.
- **Unité VI** (15 - 0 cm ; 2 470 - 2 040 ans cal BP) : cette unité est marquée par une forte augmentation du COT atteignant des valeurs de 1% alors que le C:N tend à augmenter.

**Tableau IV-2.3** - Descriptif statistique des résultats des analyses élémentaires, en fonction des unités lithologiques, de la carotte CF02-02A

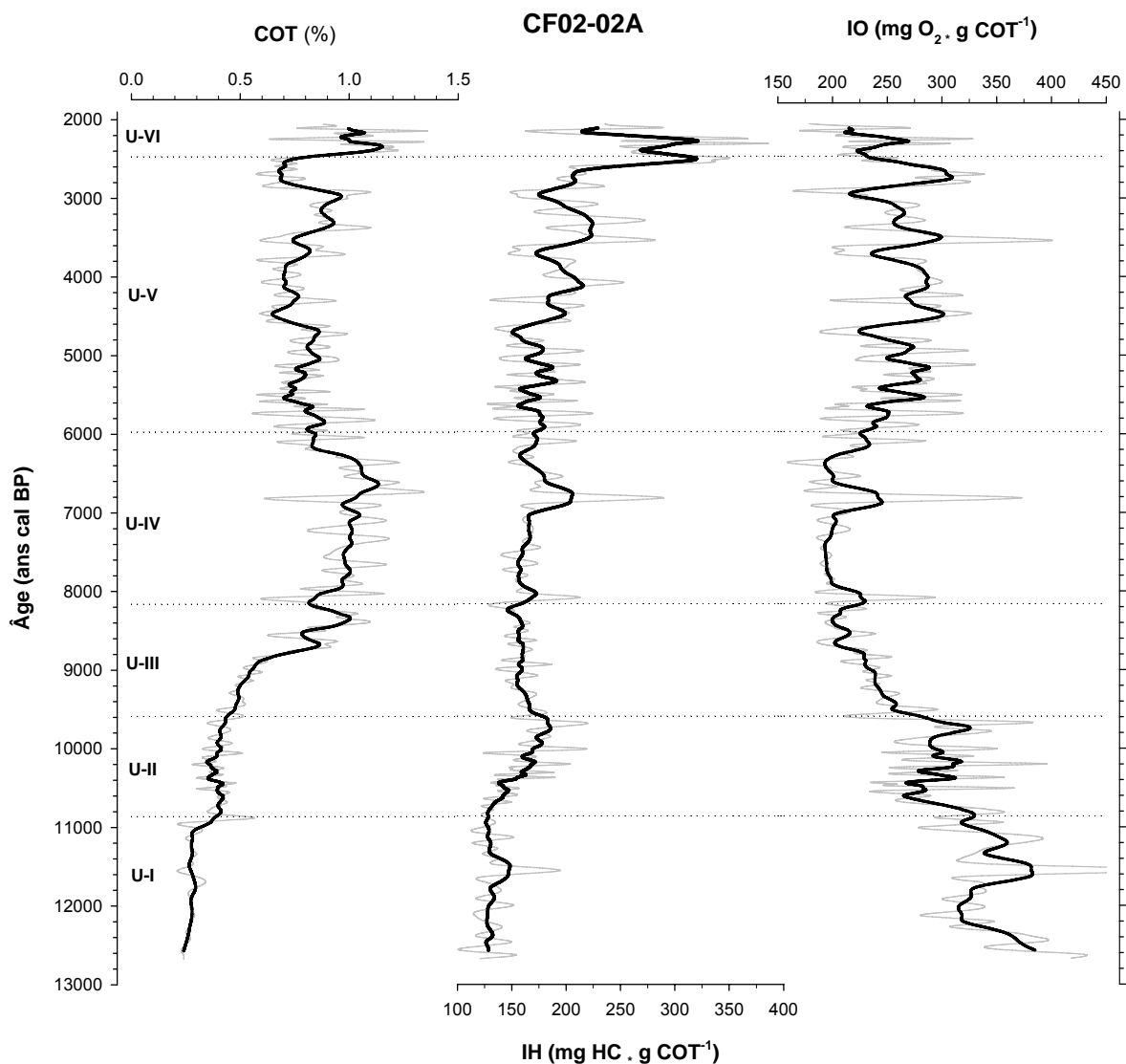
		Moy.	Max.	Min.	E-T
Unité VI	CT	4,33	4,48	4,12	0,112
	COT	1,02	1,36	0,65	0,202
	C:N	7,22	10,42	4,08	1,571
Unité V	CT	4,37	6,76	2,78	0,663
	COT	0,78	1,10	0,58	0,133
	C:N	7,68	14,07	3,61	2,004
Unité IV	CT	4,50	5,13	3,49	0,262
	COT	0,97	1,32	0,61	0,175
	C:N	6,56	13,08	3,05	3,063
Unité III	CT	4,10	4,63	3,69	0,259
	COT	0,69	1,08	0,39	0,205
	C:N	10,29	19,06	7,39	2,236
Unité II	CT	5,12	6,68	4,16	0,598
	COT	0,39	0,51	0,28	0,052
	C:N	9,04	14,61	6,02	2,048
Unité I	CT	7,61	10,07	5,66	1,162
	COT	0,28	0,56	0,21	0,062
	C:N	12,55	50,66	5,81	9,130



**Figure IV.2-5 :** Teneurs élémentaires de carbone total, carbone organique total, ratio C:N et carbone inorganique, des sédiments de la carotte CF02-02A

#### IV.2.4. Pyrolyse Rock-Eval

Les résultats obtenus à partir de la pyrolyse Rock-Eval 6 ici exploités sont le COT (%), l'indice d'hydrogène (IH) et l'Indice d'Oxygène (IO) Ils sont présentés figure IV.2-6 et dans le tableau IV.2-4. Seules les variations des indices IH et IO sont décrites ci-dessous, le COT ayant déjà été décrit dans la section antérieure (analyse élémentaire). Les variations de ces deux indices le long de la carotte CF02-02A confirme les coupures lithologiques et mettent en évidence l'existence de deux sous-unités dans l'Unité II.



**Figure IV-2.6 :** Teneur en carbone organique total, indice d'hydrogène et indice d'oxygène dérivés de la pyrolyse Rock-Eval 6, des sédiments de la carotte CF02-02A.

- **Unité I** (228 - 195 cm ; 12 870 - 10 860 ans cal BP) : elle est caractérisée par de faibles valeurs d'IH variant autour de 130 mgHC\*gCOT<sup>-1</sup>. Parallèlement, les valeurs de l'IO indiquent des valeurs moyennes de 350 mgO<sub>2</sub>\*gCOT<sup>-1</sup>, affichant une diminution. Il est à rappeler que dans cette unité le COT reste stable mais faible, soit 0,2% en moyenne. Ces faibles valeurs de COT rendent l'exploitation des indices IO et IH difficile.
- **Unité II** (195 - 160 cm ; 10 860 - 9 590 ans cal BP) : cette unité est caractérisée par une augmentation progressive des valeurs de l'IH de 120 vers des valeurs de 220 mgHC\*gCOT<sup>-1</sup>. Les valeurs de l'IO sont stables, autour de 300 mgO<sub>2</sub>\*gCOT<sup>-1</sup>.
- **Unité III** (160 - 130 cm ; 9 590 - 8 160 ans cal BP) : l'IH reste stable, variant autour de 160 mgHC\*gCOT<sup>-1</sup>. Quant aux valeurs de l'IO, elles diminuent progressivement tout au long de l'unité III dans laquelle les valeurs atteignent 190 mgO<sub>2</sub>\*gCOT<sup>-1</sup>.
- **Unité IV** (130 - 95 cm ; 8 160 - 5 970 ans cal BP) : à part des pics localisés et bien marqués dans cette unité, les valeurs de l'IH et de l'IO sont généralement stables, variant respectivement autour de 170 mgHC\*gCOT<sup>-1</sup> et 210 mgO<sub>2</sub>\*gCOT<sup>-1</sup>.
- **Unité V** (95 - 15 cm ; 5 970 - 2 470 ans cal BP) : cette unité est caractérisée par des valeurs d'IH variant autour de 190 mgHC\*gCOT<sup>-1</sup> avec une légère augmentation à partir de 60 cm où elles atteignent au sommet des valeurs maximales de l'ordre de 350 mgHC\*gCOT<sup>-1</sup>. Par ailleurs, après une légère augmentation à la base de cette unité, l'IO affiche une variabilité constante autour d'une valeur moyenne de 260 mgO<sub>2</sub>.gCOT<sup>-1</sup> jusqu'au sommet.
- **Unité VI** (15 - 0 cm ; 2 470 - 2 040 ans cal BP) : cette unité est marquée tout d'abord par le maintien de fortes valeurs de l'IH (270 mgHC\*gCOT<sup>-1</sup>), qui



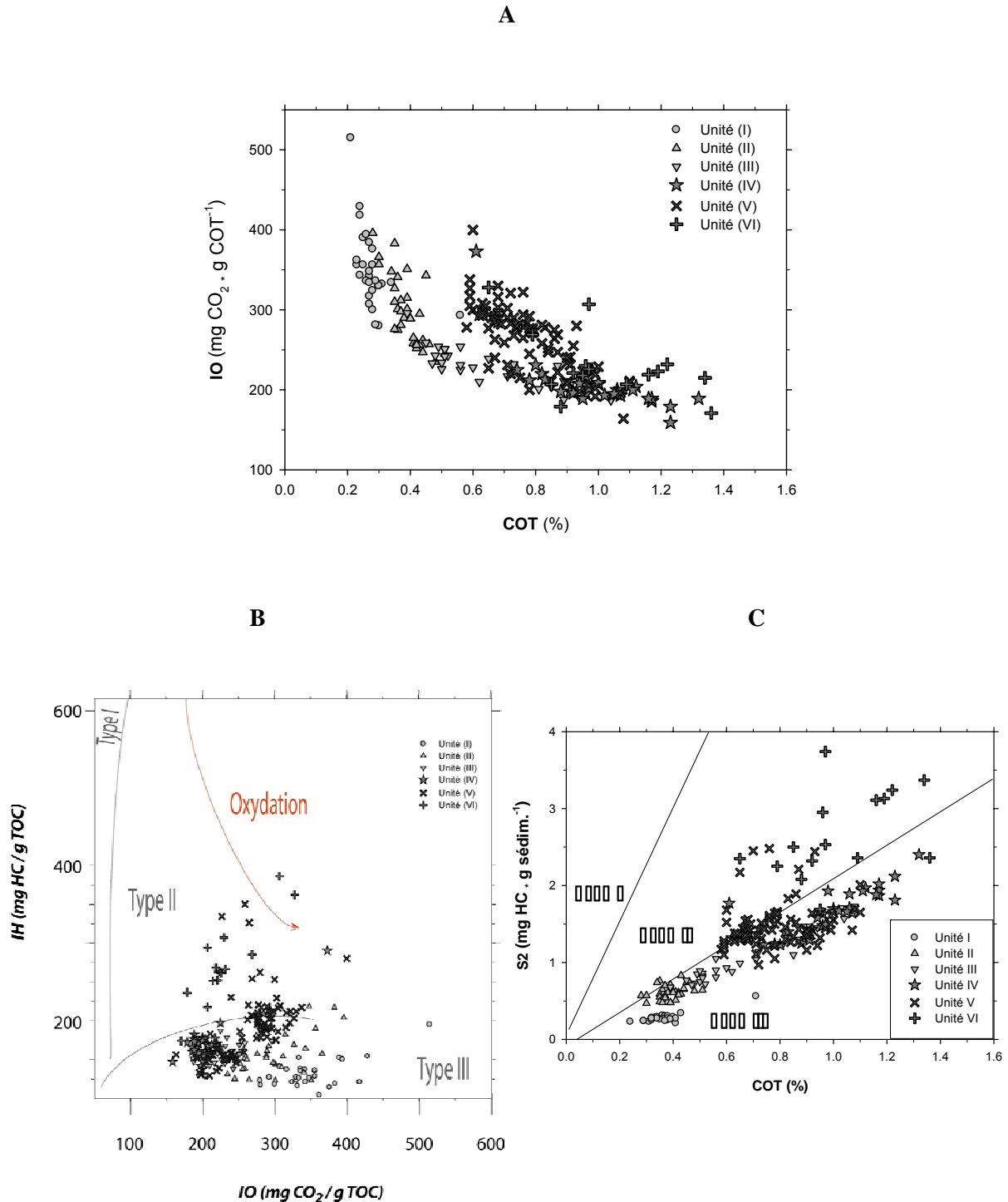
diminuent vers le sommet où elles atteignent des valeurs de 175 mgHC\*gCOT<sup>-1</sup>. Parallèlement, les valeurs de l'IO affichent une légère baisse (en moyenne 230 mgO<sub>2</sub>\*gCOT<sup>-1</sup>), présentant la même variabilité que dans l'Unité V.

**Tableau IV.2-4 :** Descriptif statistique des résultats des pyrolyses Rock-Eval, en fonction des unités lithologiques, de la carotte CF02-02A

			Moyenne	Maximum	Minimum	Ecart-type
Unité VI	COT		1,02	1,36	0,65	0,202
	IH		267	386	174	58
	IO		230	328	171	42
Unité V	COT		0,78	1,10	0,58	0,133
	IH		192	350	129	43
	IO		264	400	164	42
Unité IV	COT		0,97	1,32	0,61	0,175
	IH		171	290	142	26
	IO		211	373	159	38
Unité III	COT		0,69	1,08	0,39	0,205
	IH		158	187	129	13
	IO		226	296	187	25
Unité II	COT		0,39	0,51	0,28	0,052
	IH		158	218	123	26
	IO		296	396	233	43
Unité I	COT		0,28	0,56	0,21	0,062
	IH		132	195	104	18
	IO		350	515	280	49

La présence de carbonates a une influence assez importante sur l'IO, comme cela est décrit dans Katz (1983). La figure IV.2-7A montre bien cette influence, où les échantillons de la partie basale de la carotte (unités I, II et III) riches en carbonates et pauvres en COT présentent des valeurs élevées de l'IO, formant ainsi deux groupes distincts. Le graphique de Van Krevelen, basé sur l'IH et l'IO, n'est ainsi pas suffisamment fiable pour définir les types de matière organique, et nous faisons donc usage du diagramme de dispersion du S2 *versus* le COT en parallèle, selon Langford & Blanc-Valleron, (1990) *in* Tyson (1995), pour un meilleur partage des types. Les types de matière organique ainsi définis par la pyrolyse Rock-Eval que l'on rencontre le long de la carotte sont présentés dans la figure IV.2-7B et C. D'une façon générale la matière organique évolue d'une origine plutôt du type III avec de faibles teneurs de COT et d'IH et des valeurs élevées de l'IO, vers une matière de type II. Ceci indique à la base un

mélange entre une matière de source terrestre et une matière de source marine avec un degré certain de dégradation, et au sommet une matière d'origine marine mieux préservée.



**Figure IV-2.7** : Distribution : **A** – des valeurs d'IO contre les teneurs en COT ; **B** – de l'IH contre l'IO ; et **C** – du S2 contre le COT, dérivés de la pyrolyse Rock-Eval 6, des sédiments de la carotte CF02-02A.

### IV.2.5 Pétrographie de la matière organique sédimentaire

L'observation pétrographique (Palynofaciès) d'un total de 66 échantillons (Tableau IV.2-5), a permis l'identification de 19 fractions organiques classées par ordre croissant en fonction de leurs proportions relatives, et regroupées en deux familles majeures suivant leur origine supposée terrestre ou marine (Tableau IV.2-6). Nous avons décidé de décrire principalement les fractions dont les pourcentages sont les plus significatifs.

**Tableau IV-2.5** : Profondeur des échantillons étudiés en pétrographie (en cm) :

0,5	25,5	62,5	91,5	125,5	155,5	190,5
3,5	30,5	65,5	94,5	128,5	160,5	194,5
4,5	35,5	67,5	95,5	130,5	161,5	195,5
5,5	38,5	69,5	100,5	134,5	165,5	199,5
7,5	39,5	70,5	105,5	135,5	170,5	213,5
10,5	40,5	75,5	108,5	140,5	175,5	226,5
15,5	45,5	80,5	109,5	145,5	180,5	
20,5	50,5	85,5	110,5	149,5	182,5	
21,5	55,5	88,5	115,5	150,5	183,5	
22,5	60,5	90,5	120,5	154,5	185,5	

Parmi les fractions d'origine marine, les matières organiques amorphes grumeleuses et floconneuses, respectivement notées MOAGru et MOAFlo, sont les plus importantes, présentant ensemble des pourcentages relatifs autour de 67% en moyenne (figure IV.2-7B). Celles d'origine terrestre sont principalement représentées par les cuticules et membranes (C-M) avec 5,7 %, par les ligno-cellulosiques opaques (LCO) et par les débris gélifiés (DG), chacun comptant environ pour 4,3% du total (figure IV.2-7A). Ensemble ces trois fractions supposées terrestres s'élèvent autour de 15% du total global. Il est bien évident qu'en plus de ces fractions, nous allons prendre en compte celles qui ont des caractéristiques environnementales très spécifiques comme par exemple les pyrofusinites : marqueurs d'incendies.

**Tableau IV.2-6** : Abondance moyenne des fractions palynologiques, classées par ordre décroissant, et descriptif statistique basique.

	<i>Origine supposée</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Minimum</i>	<i>Maximum</i>	<i>Ecart- type</i>
<i>MOA* grumeleuse (MOAGru)</i>	Mar**	45,0	4,3	73,7	14,2
<i>MOA floconneuse (MOAFlo)</i>	Mar	21,7	0,0	52,0	11,1
<i>Pyrite</i>	Marine	7,0	0,1	24,9	3,8
<i>Cuticules et membranes (C-M)</i>	Ter***	5,7	0,0	26,4	5,3
<i>Ligno-cellulosiques opaques (LCO)</i>	Ter	4,3	0,5	16,8	2,9
<i>Débris gélifiés (DG)</i>	Ter	4,3	0,0	37,9	6,4
<i>MOA gélifiée (MOAGel)</i>	Mar	4,0	0,0	19,3	4,3
<i>Ligno-cellulosiques amorphisés (LCA)</i>	Ter	2,9	0,0	20,5	4,1
<i>Zooplankton (Zoo)</i>	Mar	1,9	0,0	16,0	3,6
<i>MOA rougeâtre (MOARou)</i>	Ter	1,3	0,0	16,0	2,6
<i>MOA opaque (MOAOpa)</i>	Ter	0,5	0,0	4,0	0,7
<i>Algues (Alg)</i>	Mar	0,5	0,0	5,0	1,0
<i>Spores-pollens (Sp-Po)</i>	Ter	0,3	0,0	3,2	0,7
<i>Globules amorphes orangés (GAO)</i>	Mar	0,3	0,0	1,7	0,3
<i>Pyrofusinites (Pyrof)</i>	Ter	0,3	0,0	3,5	0,7
<i>Ligno-cellulosiques translucides (LCT)</i>	Ter	0,1	0,0	1,8	0,3
<i>Mycellium (Myc)</i>	Mar	0,0	0,0	2,5	0,3
<i>Dinoflagellés (Din)</i>	Mar	0,0	0,0	0,0	0,0

Obs. : \* MOA – matière organique amorphe ; \*\* Mar – marine ; \*\*\* Ter – terrestre

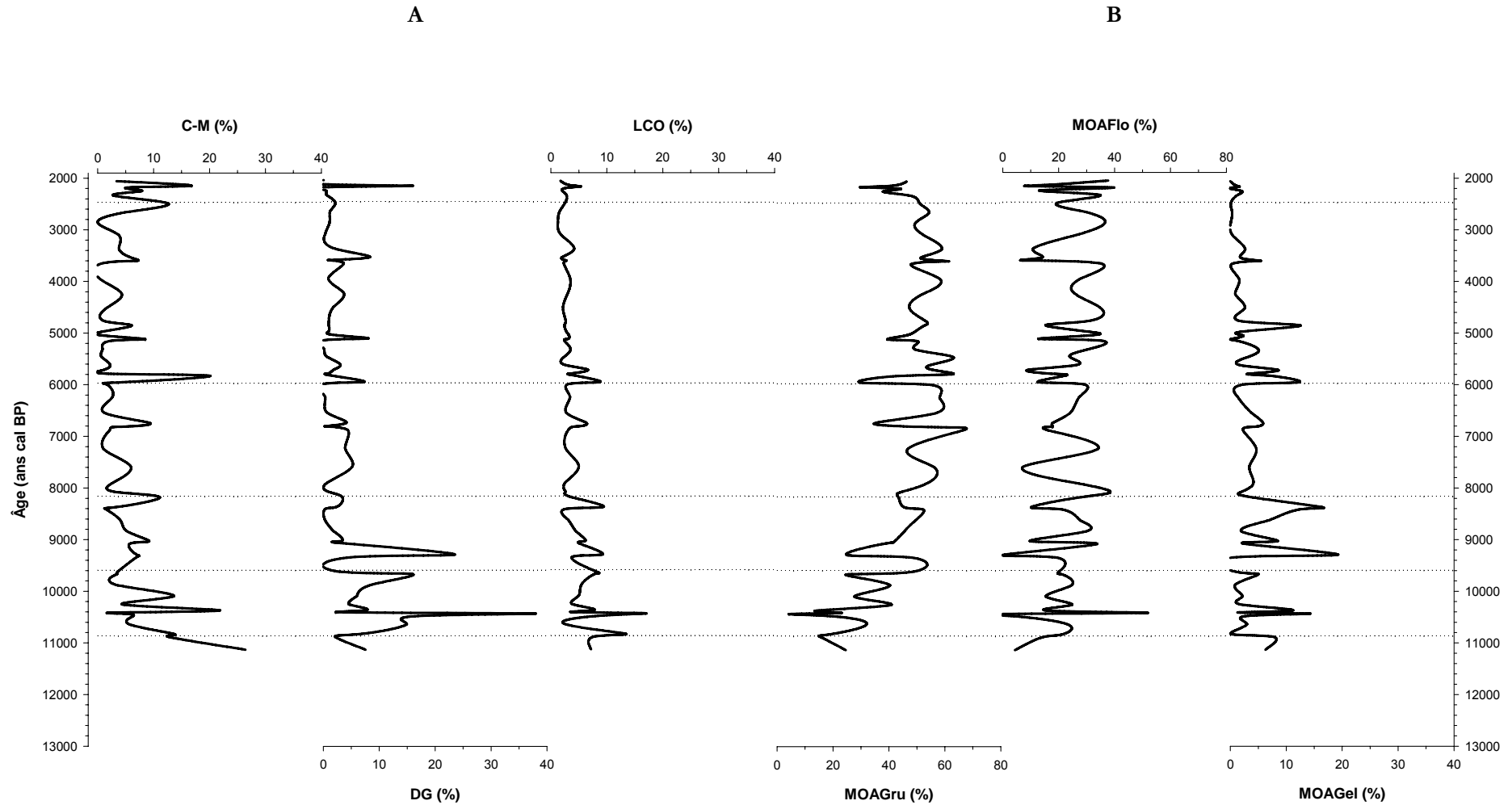
La variation en fonction de la profondeur des pourcentages relatifs de ces fractions est portée sur les figures IV.2-8. Elle révèle également l'existence de cinq unités lithologiques.

- **Unité I** (228 -195 cm ; 12 870 - 10 860 ans cal BP) : cette unité est représentée par l'étude de deux lames qui ne présentent pas une assez bonne richesse en fractions organiques. Les seuls éléments qui ont pu être identifiés et comptés sont représentés globalement par les cuticules-membranes (CM) et les débris ligno-cellulosiques opaques (LCO). Ces deux fractions présentent des pourcentages relatifs variant respectivement autour de 20,5 et 4% dans cette unité.
- **Unité II** (195-160 cm ; 10 860 - 9 590 ans cal BP) : cette unité présente une réduction graduelle des éléments d'origine terrestre, à savoir les CM, DG et LCO,

accompagnés d'une augmentation des pourcentages relatifs de la MOA dominée principalement par la MOA Grumeleuse (40%). La pyrite présente de valeurs élevées (25 %) à la base et faibles (6 %) vers le sommet de l'unité;

- **Unité III** (160-130 cm ; 9 590 - 8 160 ans cal BP) : les caractéristiques de l'unité précédente se répètent dans cette unité. On remarque une contribution plus importante de la MOA-Gélifiée.
- **Unité IV** (130-95 cm ; 8 160 - 5 970 ans cal BP) : les résultats de l'observation pétrographique des échantillons appartenant à cette unité montrent que les fractions organiques amorphes sont dominantes. Leurs pourcentages relatifs en général se stabilisent, variant autour de 50% pour la MOA grumeleuse et de 20% pour la MOA floconneuse. Par ailleurs, on note des augmentations abruptes et localisées sur la plupart des profils des classes d'origine terrestre.
- **Unité V** (95-15 cm ; 5 970 - 2 470 ans cal BP) : l'unité IV affiche une légère tendance à l'augmentation des fractions organiques d'origine terrestre représentées par les CM (5 à 8%) sur la partie supérieure, mais les MOA dominent toujours le contenu des palynofaciès dans cette unité.
- **Unité VI** (15-0 cm ; 2 470 - 2 040 ans cal BP) : dans cette unité, on note une claire augmentation des contributions terrigènes (CM), une diminution de la MOA grumeleuse alors que la MOA floconneuse se maintient.

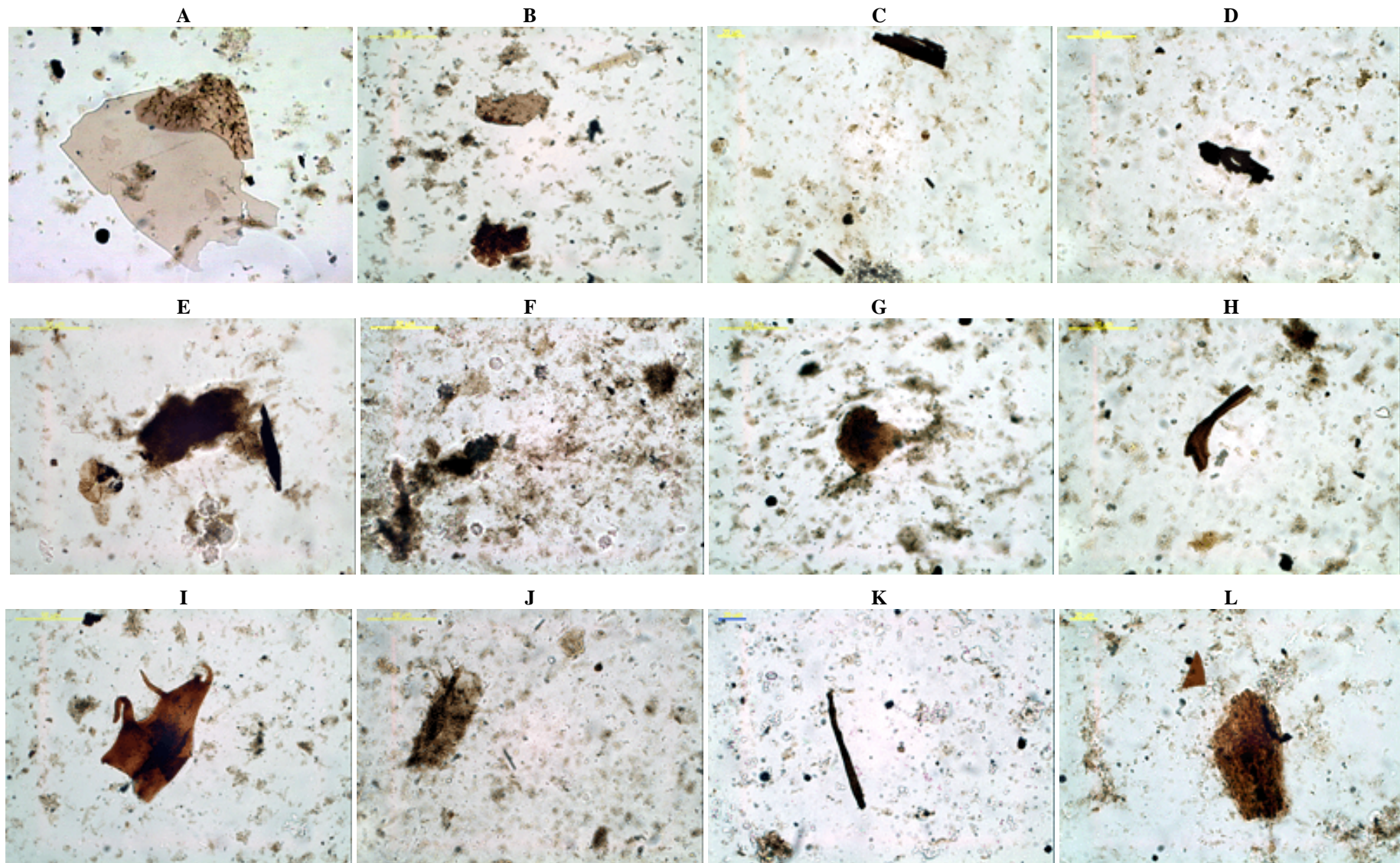
Quelques exemples des classes palynologiques rencontrées dans les sédiments du Cabo Frio sont présentés dans la figure IV.2-9. La totalité des profils de distribution en fonction de la profondeur des fractions est montrée en annexe.



**Figure IV-2.8** : Évolution des proportions relatives en fonction de la profondeur des trois principales fractions de chaque origine terrestre (A)\* et marine (B)\*\* respectivement, pour la carotte CF02-02A.

\* C-M – cuticules et membranes ; DG – débris gélifiés ;et LCO – débris ligno-cellulosiques opaques ;

\*\* MOAGru – matière organique amorphe grumeleuse ; MOAFlo – matière organique amorphe floconneuse ; et MOAGel – matière organique amorphe gélifiée

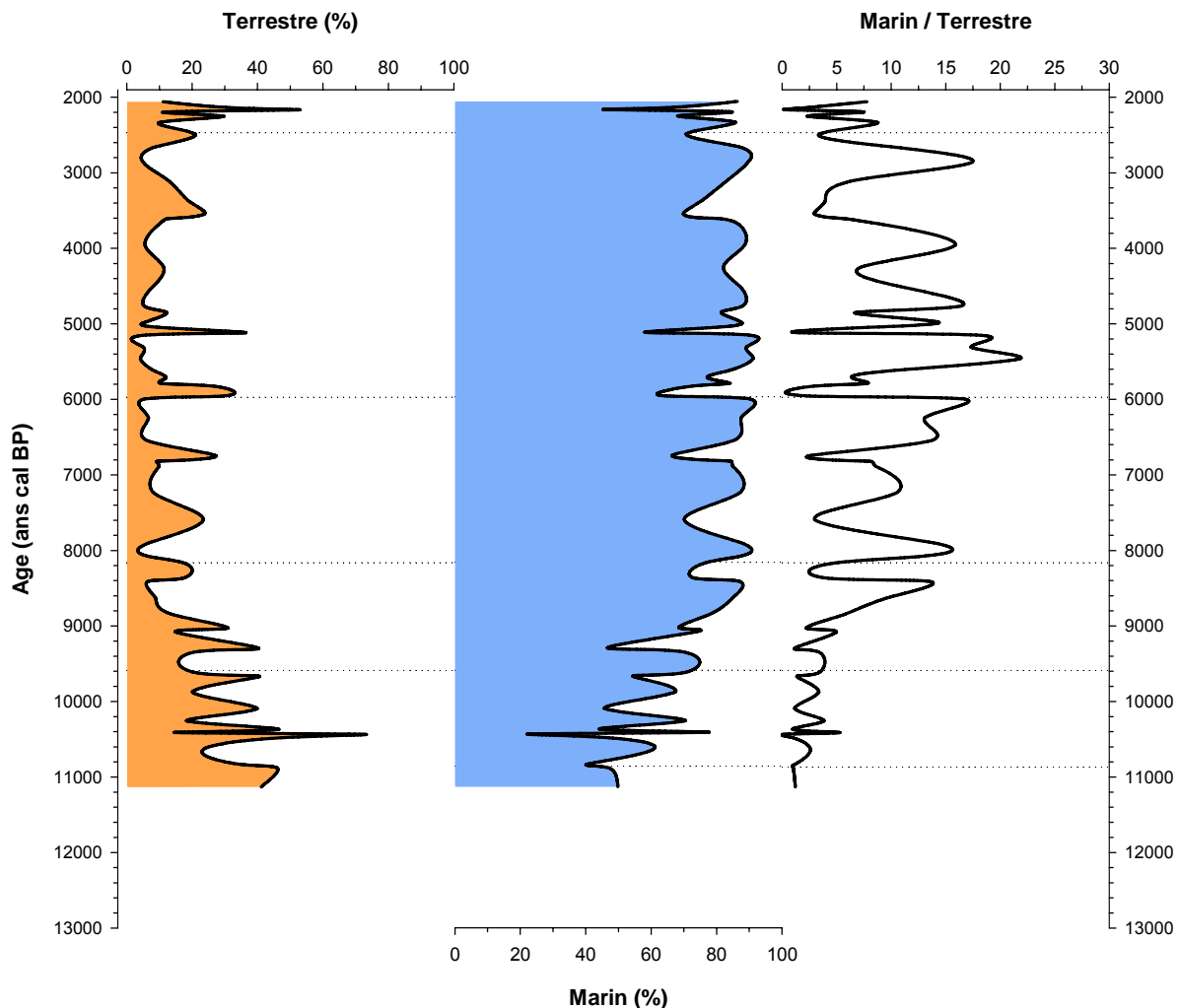


**Figure IV.2-9 :** Exemples des classes de palynofaciès rencontrés dans les sédiments de la carotte CF02-02A



**Légende de la figure IV.2-9 :**

- A** – Cuticule / membrane, zooclaste, pyrite (6-7 cm) ;
- B** – Cuticule / membrane et débris gélifié sur fond de MOA floconneuse, (69-70 cm) ;
- C** – Débris ligno-cellulosique opaque sur fond de MOA floconneuse (195-196 cm) ;
- D** – Pyrofusinite, sur fond de MOA floconneuse (03-04 cm) ;
- E** – MOA grumeleuse, débris ligno-cellulosique opaque et foraminifère (35-36 cm) ;
- F** – MOA grumeleuse sur fond de MOA floconneuse (91-92 cm) ;
- G** – MOA gélifiée et pyrite entourés de MOA floconneuse (69-70 cm) ;
- H et I** - Zooclastes (03-04 cm et 35-36 cm, respectivement) ;
- J** – Dinoflagellé sur fond de MOA floconneuse (108-109 cm) ;
- K** – Mycelium (170-171 cm);
- L** - Débris ligno-cellulosique amorphisé et petit débris gélifié (161-162 cm).



**Figure IV.2-10 :** Distribution en profondeur de proportions relatives des fractions palynologiques selon l'origine supposée (allochtone/autochtone) et leur rapport.



## IV.2.6. Distribution des marqueurs moléculaires

### IV.2.6.1. Les n-alcanes

Les n-alcanes présents dans les sédiments du Cabo Frio sont représentés par des chaînes hydrocarbonées de 16 à 33 carbones. La distribution de ces n-alcanes montre deux groupes distincts, avec des caractéristiques et des comportements différents. Un premier groupe est composé par des hydrocarbures à courte chaîne, de 16 à 23 carbones, et un second regroupe les chaînes hydrocarbonées plus longues, de 24 à 33 carbones. Ces groupes sont dorénavant traités sous les dénominations : n-alcanes courts ( $C_{16} - C_{23}$ ) et n-alcanes longs ( $C_{24} - C_{33}$ ), respectivement.

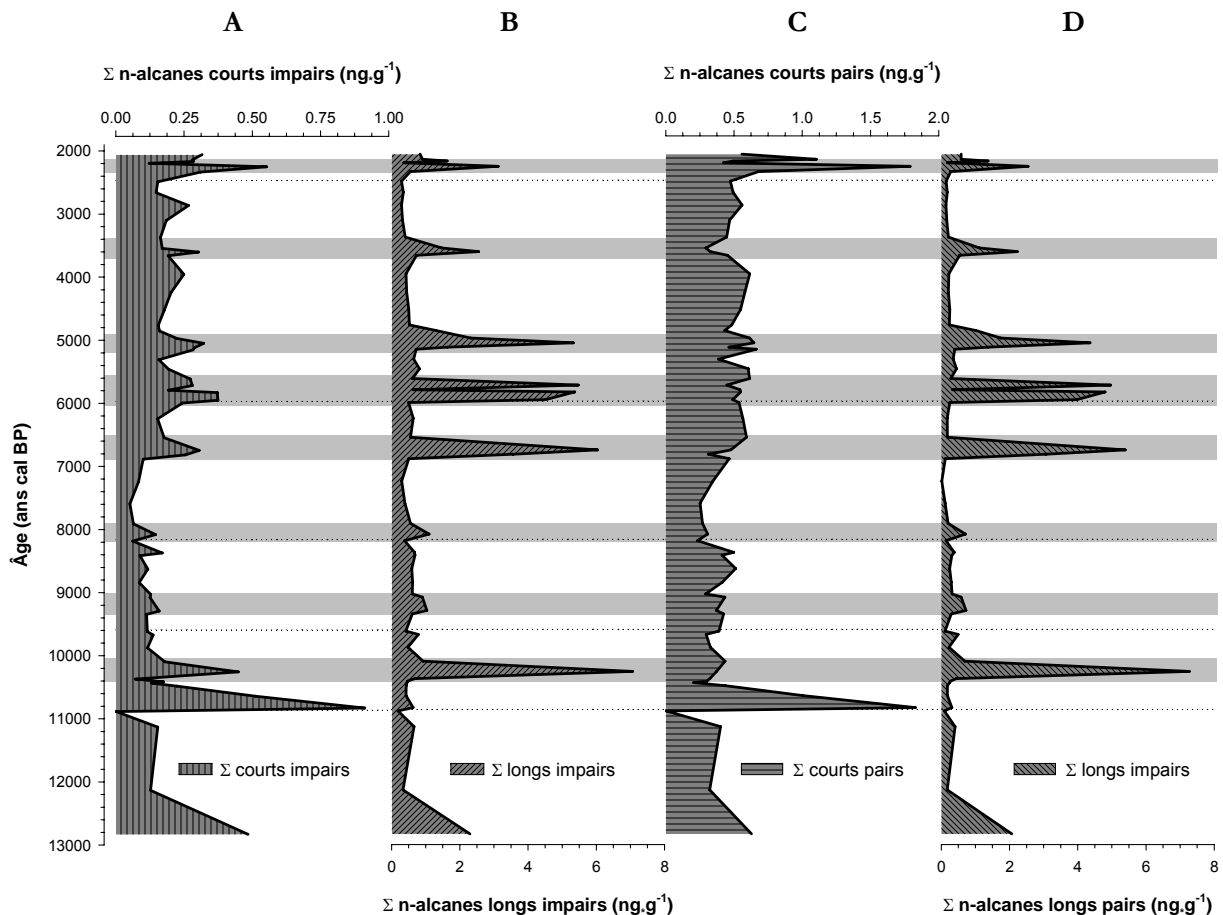
Dans la figure IV.2-11, les n-alcanes ont été regroupés en quatre familles dont les origines sont les suivantes : A – les n-alcanes courts impairs d'origine plutôt phytoplanctonique ; C – les n-alcanes courts pairs, d'origine bactérienne/microbienne ; et B et D les n-alcanes longs (impairs et pairs respectivement), qui ont comme source les végétaux supérieurs.

La figure IV.2-12 montre les différents rapports obtenus à partir de la distribution des n-alcanes : A – la somme totale des n-alcanes, dont la partie gris foncé représente la partie correspondant à la contribution des n-alcanes longs à la somme totale des n-alcanes, et la partie gris clair la partie correspondant aux n-alcanes courts ; B – présente le bilan allochtone / autochtone, similaire au TAR établi par Bourbonniere & Meyers (1996), mais calculé comme étant le rapport entre la somme de tous les n-alcanes longs et celle de tous les n-alcanes courts ; C – l'indice de préférence de carbone (CPI) des n-alcanes courts et longs ; et D la longueur moyenne des chaînes de n-alcanes longs et de n-alcanes courts.

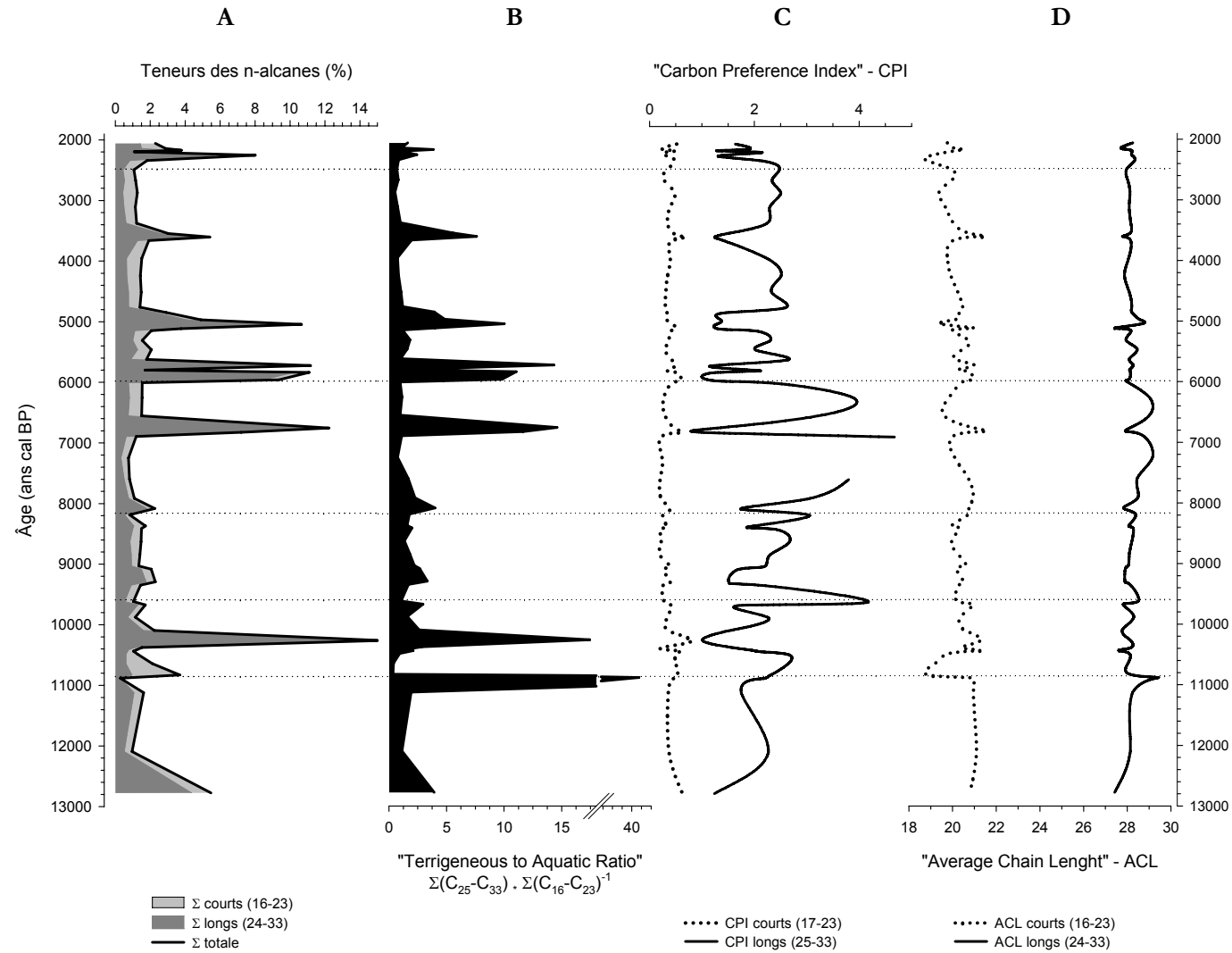
D'une façon générale, le profil des n-alcanes est majoritairement contrôlé par les n-alcanes longs, qui comptent en moyenne pour 65% du total des n-alcanes. Le profil total des n-alcanes montre divers pics de concentration isolés, et ces pics sont essentiellement dérivés de n-alcanes longs. Parallèlement, lors de ces pics isolés, les n-alcanes courts pairs présentent en général une réduction de concentration tandis que les n-alcanes courts impairs ont le comportement opposé.

Les n-alcanes courts impairs montrent une tendance à la réduction entre 11 000 et 7 600 ans cal BP, et une nette augmentation de concentration après 7 600 ans cal BP où ils varient autour de  $0,25 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ . Les n-alcanes courts pairs évoluent quant à eux autour de  $0,30 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$  de la base à 8 400 ans cal BP, montrent une légère réduction jusqu'à 7 600 ans cal BP, augmentent ensuite jusqu'à 6 600 ans cal BP et restent assez stables, autour de  $0,50 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$  jusqu'au sommet.

Les n-alcanes longs pairs et impairs connaissent des variations similaires entre elles, avec cette nuance toutefois que les chaînes impaires sont majoritaires, à hauteur de 65% en moyenne. Lors des pics en revanche, les proportions de chaînes longues paires impaires tendent à l'égalité, comme le montrent les indices de préférence de carbone qui se situent alors autour de 1 (figures IV.2-12C et IV.2-13B). Les n-alcanes longs sont stables entre 12 000 et 8 000 ans cal BP, subissent une réduction entre 8 000 et 7 000 ans cal BP, augmentent jusqu'à 5 400 ans cal BP et affichent une réduction progressive jusqu'à 2 400 ans cal BP.

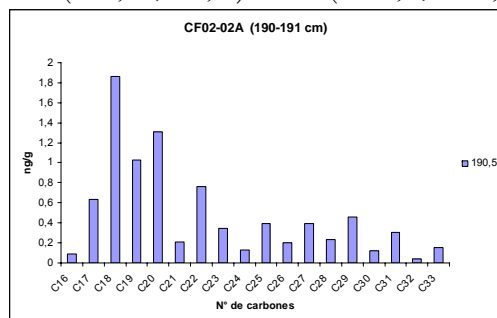


**Figure IV.2-11 :** Distribution, en fonction de la profondeur, des quantités de n-alcanes selon la longueur des chaînes et selon leur nombre pair ou impair de carbones.

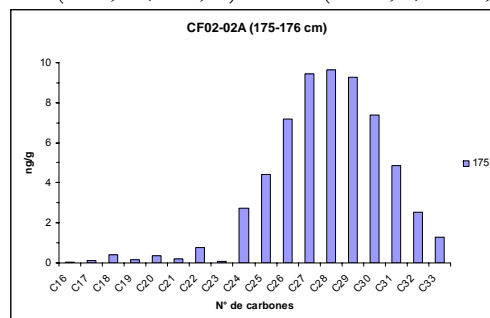


**Figure IV.2-12 :** Profils de : **A** – la teneur en n-alcanes courts, en n-alcanes longs et la teneur générale en n-alcanes ; **B** – du rapport entre la teneur en n-alcanes longs et de la teneur en n-alcanes courts (TAR); **C** – de l'indice de préférence de carbone CPI; et **D** – de la longueur moyenne de chaînes, le long de la carotte CF02-02A.

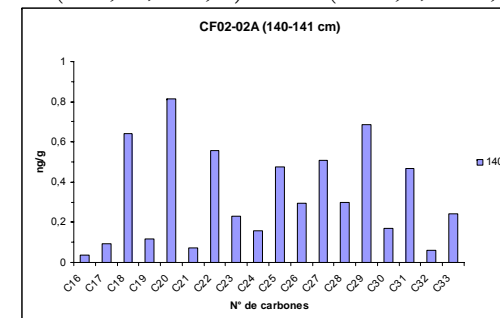
**A – (190-191 cm)**  
CPI (C=0,51 ; L=2,63) ACL (C=19,2 ; L=28,0)



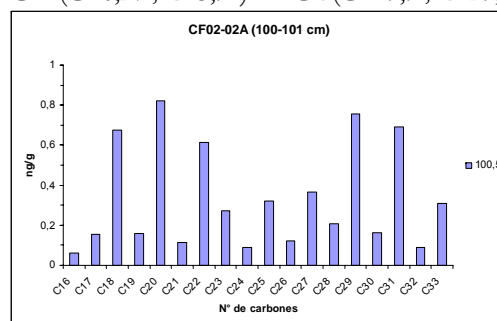
**B – (175-176 cm)**  
CPI (C=0,82 ; L=1,02) ACL (C=21,3 ; L=28,1)



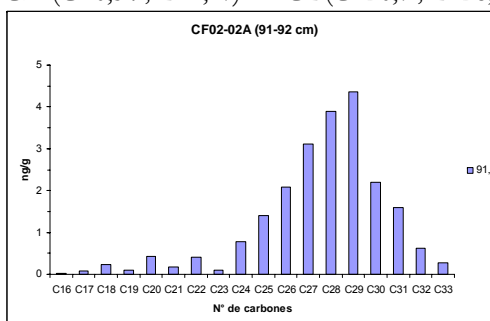
**C – (140-141 cm)**  
CPI (C=0,22 ; L=2,67) ACL (C=20,0 ; L=28,2)



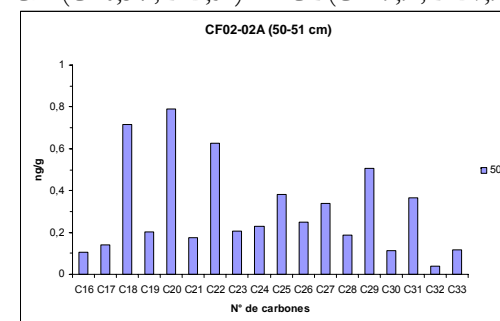
**D – (100-101 cm)**  
CPI (C=0,27 ; L=3,91) ACL (C=19,9 ; L=29,0)



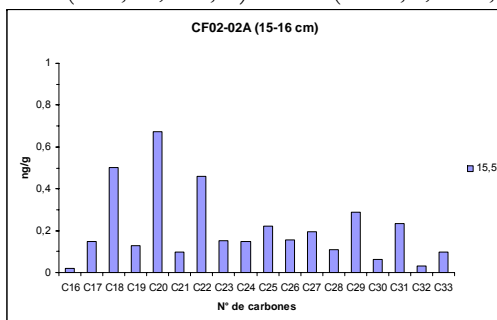
**E – (91-92 cm)**  
CPI (C=0,54 ; L=1,17) ACL (C=20,7 ; L=28,1)



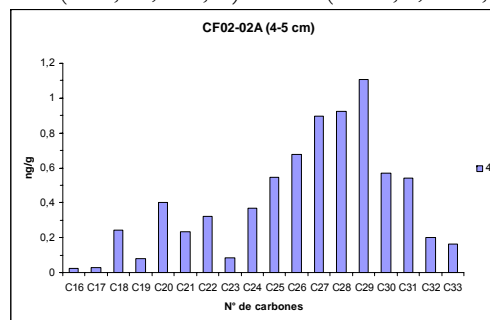
**F – (50-51 cm)**  
CPI (C=0,34 ; L=2,51) ACL (C=19,9 ; L=27,9)



**G – (15-16 cm)**  
CPI (C=0,31 ; L=2,47) ACL (C=19,9 ; L=28,0)



**H – (4-5 cm)**  
CPI (C=0,50 ; L=1,28) ACL (C=20,5 ; L=28,0)



**I – (0-1 cm)**  
CPI (C=0,52 ; L=1,64) ACL (C=19,8 ; L=28,3)

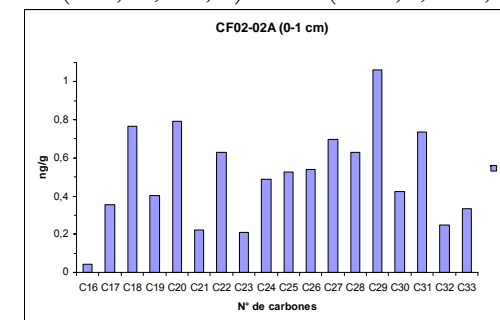


Figure IV.2-13 : Quelques exemples de distributions des n-alcane dans la carotte CF02-02A.

Le rapport terrestre/aquatique TAR (figure IV.2-12B) montre une plus grande contribution terrestre entre la base et 7 600 ans cal BP, puis après 7 600 ans BP une réduction graduelle mais avec la présence de pics de plus grande concentration.

L'indice de préférence de carbone CPI (figure IV.2-12C) des n-alcanes courts est toujours inférieur à 1 (0,3 en moyen), du fait de la domination des chaînes paires. On retrouve toutefois des valeurs de CPI plus élevées lors des pics de n-alcanes longs (0,5 en moyenne). Ces valeurs sont dues à des augmentations des proportions de n-alcanes courts impairs au détriment des n-alcanes pairs. Le CPI des n-alcanes longs est beaucoup plus variable. Le CPI moyen des pics est de 1,3 tandis que le reste des échantillons affiche un CPI moyen de 2,5. Ces faibles valeurs de CPI indiquent une matière organique très dégradée, et la MO représentée par les pics est encore plus dégradée. Le profil des CPI montre une augmentation des valeurs entre 10 400 et 7 000 ans cal BP qui se stabilisent ensuite.

La longueur moyenne des chaînes des n-alcanes courts montre un comportement similaire au CPI. D'une façon générale, l'ACL montre une réduction des valeurs entre la base et le sommet, de 21 à 19. À la base, entre 10 800 et 10 600 ans cal BP, on retrouve une baisse significative de la longueur de chaîne, correspondant au pic de concentration de n-alcanes courts. Quant aux n-alcanes longs, leur ACL évolue autour de 28. Les pics de concentration possèdent des ACL légèrement plus bas, sauf pour le pic de 11 000 ans cal BP. Entre 7 600 et 6 000 les ACL longs sont les plus élevés.

La figure IV.2-13 montre quelques exemples de distribution des n-alcanes, avec les indices de préférence de carbone (CPI) et les longueurs moyennes des chaînes (ACL) des n-alcanes courts et longs, de la base au sommet de la carotte. A – présente l'échantillon avec la plus grande contribution de n-alcanes courts ; B – présente l'échantillon avec la plus grande contribution de n-alcanes longs. À noter, le CPI très proche de 1, correspondant à l'égalité des proportions entre les chaînes paires et impaires. Ce profil est caractéristique d'une matière organique très dégradée ou remaniée ; les figures E et H ont la même caractéristique ; les autres figures présentent des mélanges de différentes proportions.

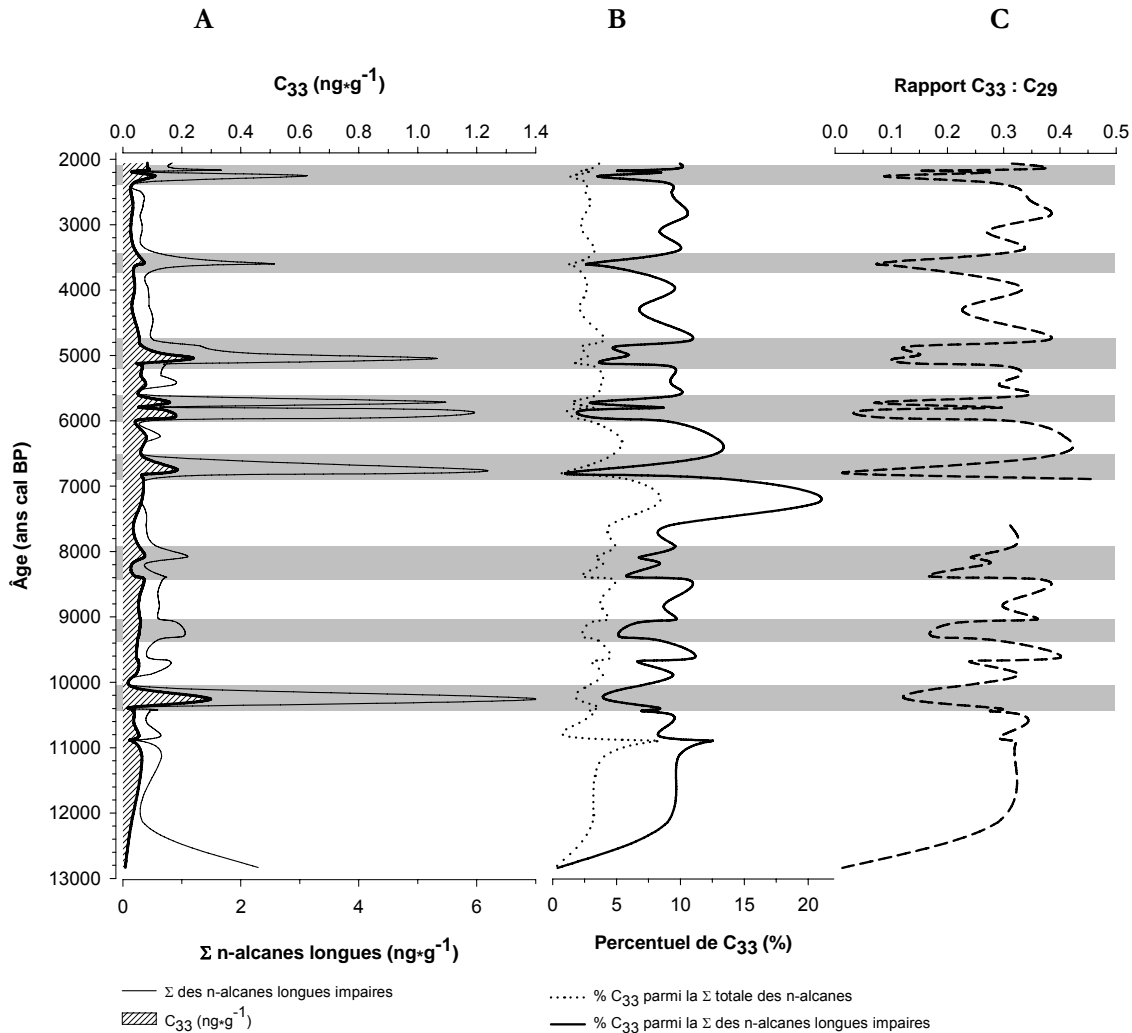
La variation des n-alcanes en fonction de la profondeur est montrée dans la figure IV.2-10. L'évolution au cours des six unités lithologiques est la suivante :

- **Unité I** (228 - 195 cm ; 12 870 - 10 860 ans cal BP). Elle montre une réduction à la fois des n-alcanes courts et des longs de la base au sommet de l'unité.
- **Unité II** (195 - 160 cm ; 10 860 - 9 590 ans cal BP). Cette unité possède le plus grand pic de n-alcanes (60 ng\*g-1) et la contribution la plus importante de n-alcanes courts (6 ng\*g-1).
- **Unité III** (160 - 130 cm ; 9 590 - 8 160 ans cal BP). L'unité est stable, ne présentant aucune tendance particulière.
- **Unité IV** (130 - 95 cm ; 8 160 - 5 970 ans cal BP). Après une réduction générale de tous les profils à la base, l'unité montre une augmentation de la concentration des n-alcanes courts à partir de 105 cm, après un pic de n-alcanes longs au centre de l'unité.
- **Unité V** (95 - 15 cm ; 5 970 - 2 470 ans cal BP). Cette unité est parsemée de pics (4 au total) associés à une tendance à la diminution des n-alcanes longs. Les n-alcanes courts sont stables, avec les plus grandes concentrations du profil.
- **Unité VI** (15 - 0 cm ; 2 470 - 2 040 ans cal BP) est caractérisée par l'augmentation des tous les n-alcanes vers le sommet.

### **Le C<sub>33</sub> en tant que marqueur d'aridité sur les zones sources de la MOS.**

Le C<sub>33</sub> peut être utilisé comme indicateur d'aridité dans les zones sources de la fraction longue des n-alcanes retrouvés dans les sédiments. Les plantes terrestres répondent et/ou s'adaptent à l'augmentation de l'aridité par le rallongement des chaînes qui composent les cires que revêt leur feuillage, ce qui réduit la déperdition d'eau vers l'environnement extérieur. On remarque alors une augmentation de la proportion de C<sub>33</sub> parmi les n-alcanes longs impairs.

La variation du profil de C<sub>33</sub> le long de la carotte CF02-02A est similaire à la somme des n-alcanes longs (C<sub>24</sub> à C<sub>33</sub>) (Figure IV.2-14A). La proportion de C<sub>33</sub> dans la somme totale des alcanes présente une augmentation entre 11 000 et 7 000 ans cal BP, et une réduction postérieure jusqu'au sommet, ce qui pourrait indiquer une augmentation de l'aridité de la base jusqu'au centre de la carotte, et un retour à des conditions humides vers le sommet (Figure IV.2-13B). Cependant, cette réduction du centre vers le sommet est plus vraisemblablement due à l'augmentation de la quantité des n-alcanes courts, qui se fait au même moment (à partir d'environ 8 000 ans cal BP). Une autre caractéristique remarquable est la diminution de la proportion de C<sub>33</sub> parallèlement aux pics de concentration des n-alcanes longs. Cette diminution ne dépend pas des n-alcanes courts car ils sont minoritaires à ces niveaux, et la faible proportion de C<sub>33</sub> indiquerait ainsi des conditions plutôt humides de la zone source. En effet, la réduction proportionnelle de C<sub>33</sub> au niveau des pics ne peut pas être imputée à la dégradation, car les chaînes sont plus résistantes. Quant à la proportion de C<sub>33</sub> par rapport aux n-alcanes longs impairs (marqueur de végétaux supérieurs), elle est stable le long de la carotte, mais affiche une augmentation entre 7 600 et 6 000 ans cal BP (figure IV.2-14B). Si l'on calcule le rapport entre le C<sub>33</sub> et le C<sub>29</sub> (longueur de chaîne majoritaire parmi les n-alcanes longs) (figure IV.2-14C), on retrouve un mode de variation similaire, y compris pour les petits pics de concentration de n-alcanes longs de la base (entre 10 000 et 7 000 ans cal BP) malgré la faiblesse des concentrations. Ceci suggère deux origines ou modes de transport différents des matières qui composent les pics des n-alcanes longs et celles du reste de la carotte.



**Figure IV.2-14 :** **A** - Comparaison entre le profil de concentration du n-alcane  $C_{33}$  et la somme des concentrations des n-alcanes longs impairs ; **B** – proportion du n-alcane  $C_{33}$  en relation à la quantité totale de n-alcanes et à la quantité de n-alcanes longs impairs ; **C** – rapport entre le n-alcane  $C_{33}$  et le n-alcane long majoritaire ( $C_{29}$ ), le long de la carotte CF02-02A



#### IV.2.6.2. Les alcénones

Les alcénones ont été identifiées par CG-SM et quantifiées par CG-FID. Les standards internes les plus habituellement utilisés pour les quantifications, à savoir le 5- $\alpha$ -Cholestane et le Squalane, non pas pu être utilisés dans les analyses des sédiments de Cabo Frio car la chromatographie a révélé que ces composés étaient soit déjà naturellement présents, ou alors que les sédiments contenaient d'autres composés qui s'éluèrent avec le même temps de rétention que le Cholestane et le Squalane, dans la fraction 4 de la méthode de séparation adaptée de Ternois *et al.* (1998). D'autres molécules ont été testées comme standards, sans résultat significatif. Quoi qu'il en soit, cette absence de quantification absolue des alcénones n'a pas empêché le calcul des paléotempératures, puisqu'à la place des valeurs de concentration, on a utilisé les aires des pics dans les calculs. De cette façon la formule traditionnelle de calcul de l'indice  $U'_{37}$

$$U'_{37} = ([C_{37:2}]) * ([C_{37:2}] + [C_{37:3}])^{-1},$$

a été remplacée par la formule suivante :

$$U'_{37} = (\text{aire du pic } C_{37:2}) * (\text{aire du pic } C_{37:2} + \text{aire du pic } C_{37:3})^{-1}$$

Aucune contrainte à ce mode de calcul n'existe puisque, pour calculer les concentrations des composés analysés par chromatographie, on divise les aires de pic des composés par l'aire de pic du standard dont la concentration est connue. Mathématiquement, on peut donc affirmer que :

$$U'_{37} = \left( \frac{\text{aire du pic } C_{37:2}}{\text{aire du pic std}} \right) * \left( \frac{\text{aire du pic } C_{37:2}}{\text{aire du pic std}} + \frac{\text{aire du pic } C_{37:3}}{\text{aire du pic std}} \right)^{-1}$$

La concentration des alcénones dans les sédiments est souvent utilisée comme paramètre d'estimation de la productivité primaire passée. Comme les concentrations des alcénones dans les sédiments de Cabo Frio non pas pu être déterminées, cette estimation n'a pas pu être menée. Un autre moyen d'estimer la productivité est la concentration des n-alcanes courts, traitée dans la section précédente.

Les calculs des paléotempératures des eaux superficielles de la région de Cabo Frio ont été réalisés en utilisant l'équation publiée par Müller *et al* (1998), calibrée à partir de l'analyse des sommets de carotte à l'échelle mondiale, en particulier de l'océan Atlantique sud :

$$T (^{\circ}\text{C}) = (U_{37}^k - 0,044) * (0,033)^{-1}$$

\* où T désigne la température en degrés Celsius

Les températures ainsi calculées sont présentées dans la figure IV.2-14. L'erreur moyenne, calculée à l'aide de répliquats est de 0,9°C (3 x l'écart-type), est représenté par la bande grise. Les caractéristiques statistiques basiques de la série de températures sont les suivantes :

	Moyenne	Maximum	Minimum	Ecart-type
Température (°C)	25,9	28,1	24,2	0,87

Le comportement de la température dans les unités stratigraphiques est le suivant :

**Unité I** (228 - 195 cm ; 12 870 - 10 860 ans cal BP) : cette unité présente une seule valeur de température (26,3°C à 195,5 cm et 27,4°C à 199,5), les autres échantillons analysés ne présentaient pas de signaux d'alcénones détectables ;

**Unité II** (195 - 160 cm ; 10 860 - 9 590 ans cal BP) : à part un pic isolé de température à la base (28,1°C – la plus chaude dans le registre), les températures varient autour de 25,5°C dans cette unité;

**Unité III** (160 - 130 cm ; 9 590 - 8 160 ans cal BP) : l'unité présente des valeurs plus chaudes à sa base ( $\sim 27^{\circ}\text{C}$ ) et moins chaudes au sommet ( $\sim 24,5^{\circ}\text{C}$ ), où une tendance de réchauffement s'amorce ensuite;

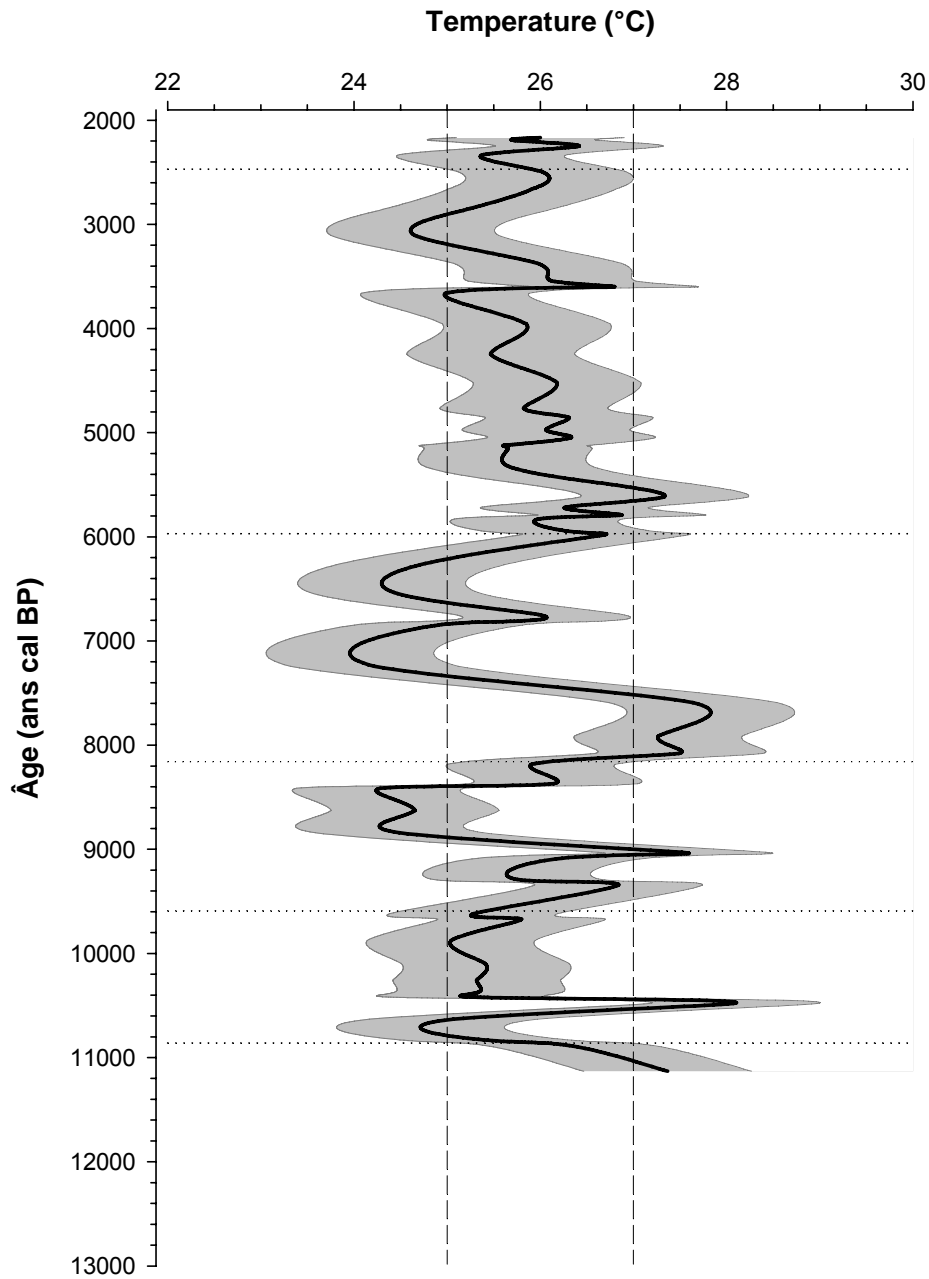
**Unité IV** (130 - 95 cm ; 8 160 - 5 970 ans cal BP) : les caractéristiques de l'unité antérieure se répètent dans cette unité, avec une amplitude des températures un peu plus importante ( $\sim 24^{\circ}\text{C}$  et  $\sim 27,5^{\circ}\text{C}$ ), et avec la température la plus froide de tout le registre;

**Unité V** (95 - 15 cm ; 5 970 - 2 470 ans cal BP) : elle présente une variation autour de  $26^{\circ}\text{C}$  avec de faibles amplitudes, qui se renforcent toutefois vers le sommet;

**Unité VI** (15 - 0 cm ; 2 470 - 2 040 ans cal BP) : le sommet de la carotte présente une variation de  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  autour de  $26^{\circ}\text{C}$ .

**Tableau IV.2-4 :** Descriptif statistique des distributions des températures calculées en fonction des unités lithologiques pour la carotte CF02-02A

	Moyenne	Maximum	Minimum	Ecart-type
Unité VI	25,8	26,4	25,4	0,39
Unité V	26,0	27,3	24,6	0,59
Unité IV	25,9	27,6	24,2	1,31
Unité III	25,8	27,5	24,3	1,10
Unité II	25,6	28,1	25,0	0,88
Unité I	26,8	27,4	26,3	0,74



**Figure IV-2.15 :** Paléotempératures des eaux de surface de la région de Cabo Frio.

Obs. : La zone grise correspond à l'erreur de la méthode, estimée à  $\pm 0,9^{\circ}\text{C}$  ; les lignes pointillées sont les limites habituelles de variation des TSM ( $25$  à  $27^{\circ}\text{C}$ ) sur la plateforme continentale SE Brésilienne pendant l'été austral, selon Castro & Miranda (1998).

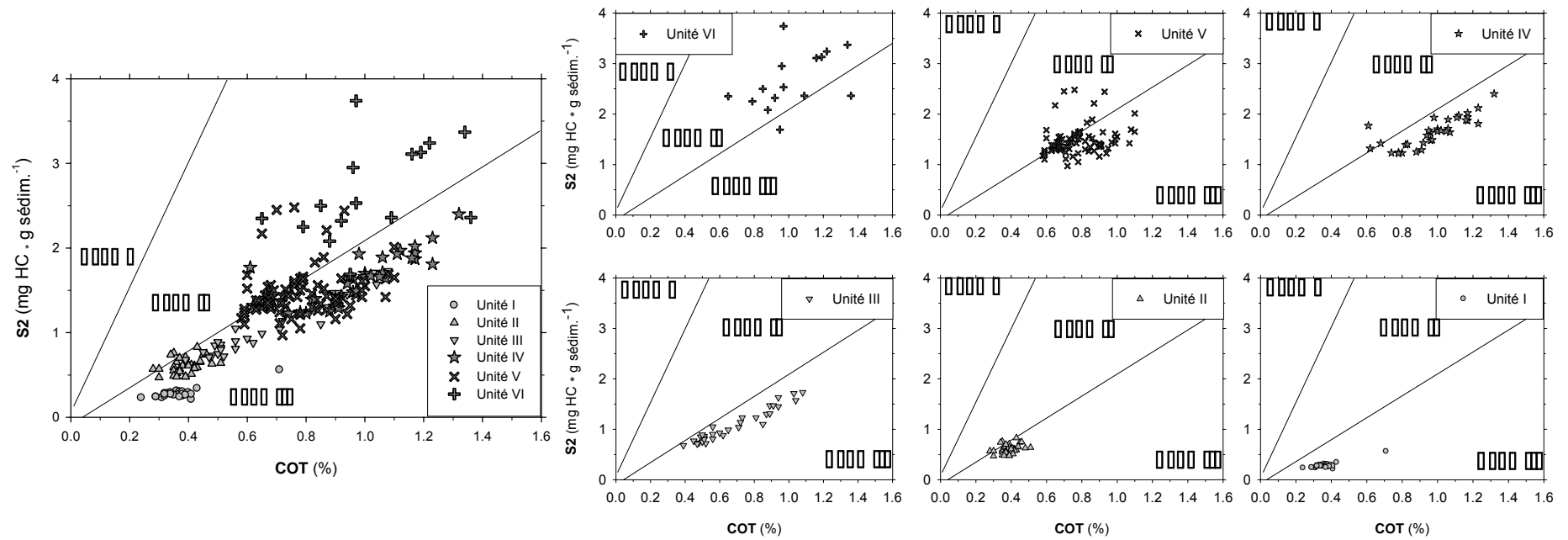
### IV.3. Discussion

Les données géochimiques élémentaires, pétrographiques et moléculaires, confirment les coupures lithologiques, et permettent de mettre en évidence deux principaux types de matières organiques (MO) sédimentaires dont les caractéristiques sont liées au mode de transport et de dépôt, et qui se répartissent de façon différente le long de la carotte étudiée. La confrontation des paramètres analytiques obtenus nous a amené à différencier six environnements organo-sédimentaires distincts. Ces données confirment une origine terrestre majoritaire de la matière organique dans les quatre premières unités (Unités I, II, III et IV), dont le mode de transport et de sédimentation sont complètement différents. *A contrario*, la MO sédimentaire déposée dans les unités V et VI correspond à un mélange de MO allochtone (terrestre) et autochtone (phytoplanctonique).

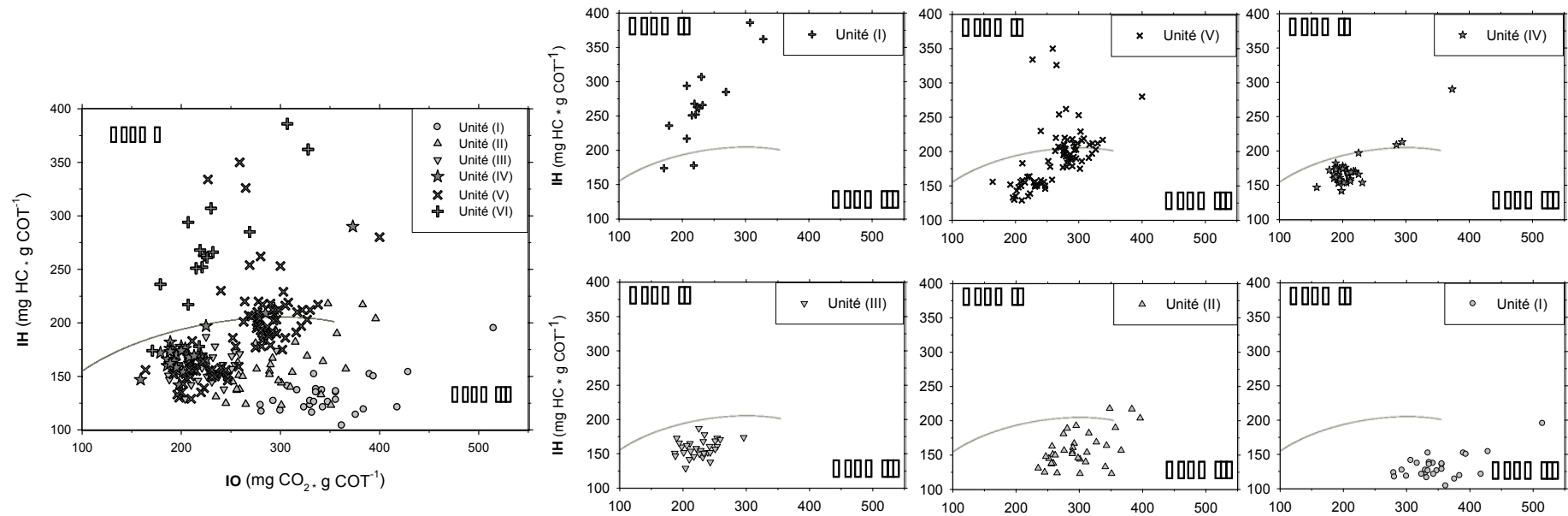
**Unité I** (228 - 195 cm ; 12 870 - 10 860 ans cal BP) : les diagrammes COT x S2 (figure IV.3-1) et de Van Kreveleen (figure IV.3-2) montrent que la MO de cette unité est de type III d'origine terrestre. Cette origine est aussi confirmée par les rapports élevés du C:N montrant des valeurs supérieures à 15. Elle est aussi évidente par les observations pétrographiques qui montrent que cette matière organique est majoritairement composée de cuticules-membranes (CM) et de débris opaques. Ces débris sont issus de végétaux supérieurs, comme le montre la distribution des n-alcanes dans cette unité, majoritairement à chaînes longues ( $C_{24}$ - $C_{33}$ ). De plus, l'indice de préférence de carbone (CPI) indique que ces végétaux supérieurs sont très dégradés et recyclés, ce qui témoigne d'un remaniement important des particules. Effectivement, cette unité basale, est composée principalement par des débris bio-carbonatés fragmentés, témoins d'un environnement de haute énergie remaniant constamment les fractions organo-minérales de ces dépôts. Il semble évident que la carotte, prélevée à 124 m par rapport au niveau actuel, a atteint le niveau de l'ancien prisme de plage de 13 000 ans  $^{14}\text{C}$  BP (14 800 ans cal BP), décrit par Kowsmann & Costa (1979) et

Kowsmann *et al.* (1979). Cette interprétation confirme donc l'origine terrestre de la MO correspondant probablement à une MO très remaniée.

**Unité II** (195 - 160 cm ; 10 860 - 9 590 ans cal BP) : cette unité, de composition plus silto-argileuse que carbonatée, comme le montre la diminution progressive des valeurs des niveaux de gris, témoigne d'un début de sédimentation plus argileuse, interprétée comme une diminution de l'énergie du transport résultant d'une augmentation du niveau de la mer (figure IV.3-3). En effet, les couplets COT-S2 et IH-IO (figures IV.3-1 et IV.3-2) montrent un nuage de points correspondant à une matière organique de type III mais avec une tendance à l'enrichissement en S2 dû à une faible dilution de la MO terrestre par la productivité organique autochtone. Les rapports C:N et les résultats des palynofaciès confirment cette tendance, car on note une augmentation progressive des MOA du palynofaciès à la faveur d'une diminution des fractions d'origine figurées terrestre. Mis à part un pic important des n-alcanes à longues chaînes, au milieu de cette unité, caractérisant un fort apport en végétaux supérieurs lors d'un événement abrupt, la distribution de ces derniers confirme aussi une domination des n-alcanes à courtes chaînes ( $C_{16}$ - $C_{24}$ ) témoignant d'un début de productivité primaire qui diminue vers le sommet de l'unité. L'indice  $ACL_{(C_{16}-C_{24})}$  de cette matière organique autochtone montre que cette dernière est dominée par des chaînes à 18 carbones à la base évoluant vers des chaînes à 20-22 carbones au sommet. Ceci implique probablement une importante production (comme des blooms de diatomées par exemple), qui est à l'origine de composés « mono-spécifiques » dont la préservation a été rendue possible par un transit dans une colonne d'eau moins importante, ou par une production plutôt benthique et/ou un enfouissement rapide dans le sédiment. La température de l'eau, autour de 25°C, est dans la partie basse de la fourchette de variation actuelle, indiquant peut-être un courant du Brésil plus faible ou plus éloigné du bord de la plateforme. En effet cet épisode, synchrone de la fin de l'événement climatique froid dans l'hémisphère Nord (Dryas récent), est marqué par un ré-amorçage de l'augmentation du niveau marin (Arz *et al.*, 1999) favorisant ainsi une production primaire. Les travaux de Behling *et al.*, 1998 ; 2002 et 2007, basés sur la



**Figure IV.3-1 :** Typologie de la matière organique sédimentaire par unité lithologique de la carotte CF02-02A représenté sur le diagramme COT x S2 (adapté de Langford & Blanc-Valleron, 1990 in Tyson, 1995).



**Figure IV.3-2 :** Typologie de la matière organique sédimentaire par unité lithologique de la carotte CF02-02A, par le diagramme IO x IH :  
Détail du pseudo diagramme de Van Krevelen.



composition pollinique de sédiments lacustres, montrent que dans la région Sudeste du Brésil, correspondant au bassin versant du Paraíba do Sul qui alimente la plateforme au nord du Cabo Frio, on rencontrait à la même époque des conditions climatiques plus humides. Ces conditions plus humides, de fortes précipitations, sont à l'origine d'événements d'érosion favorisant ainsi le transport terrigène jusqu'à la plateforme brésilienne. Cet apport abrupt important est attesté par l'augmentation des taux de sédimentation et peut être à l'origine d'un enfouissement rapide et d'une bonne préservation des fractions organiques produites durant cette époque.

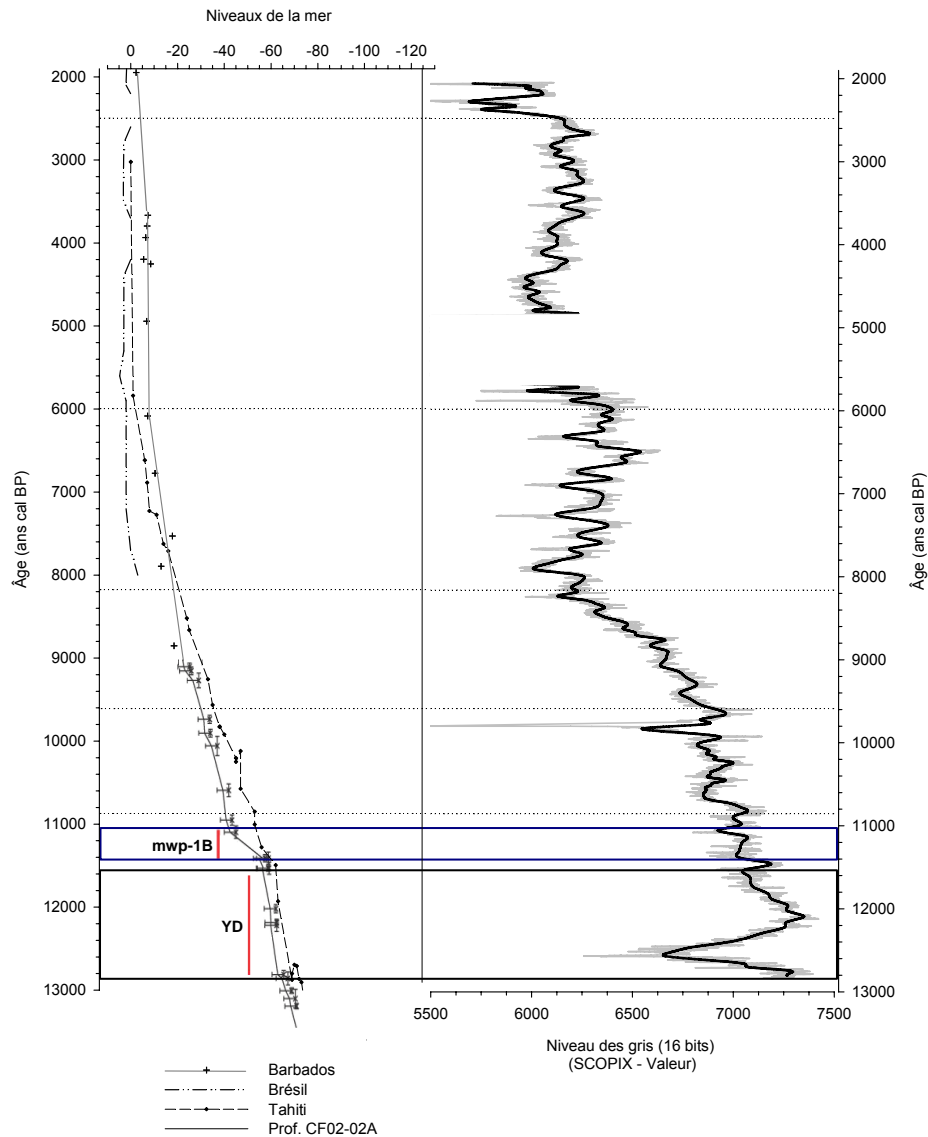
**Unité III** (160 - 130 cm ; 9 590 - 8 160 ans cal BP) : cette unité est caractérisée par une diminution progressive des valeurs de niveaux de gris témoignant d'une sédimentation plus argileuse. L'augmentation plus rapide du niveau marin est probablement à l'origine de conditions hydrodynamiques plus adéquates au dépôt de particules plus fines/légères (figure IV.3-3). Les diagrammes COT-S2 et IH-IO (figures IV.3-1 et IV.3-2) montrent un nuage de points plus dispersé, expliqué par une augmentation simultanée des valeurs du S2 et celle du COT, en raison probablement de la présence d'un autre type de matériel terrigène plus riche en carbone organique (valeurs élevées de COT) apporté lors de phases humides sur le continent (Behling *et al.*, 2007). La température de l'eau est plus chaude dans la moitié inférieure et plus froide dans la moitié supérieure par rapport à l'unité antérieure ; cela concorde avec l'augmentation du COT vers le sommet de l'unité ;

**Unité IV** (130 - 95 cm ; 8 610 - 5 970 ans cal BP) : synchrone de la stabilisation du niveau marin, qui atteint son niveau actuel entre 8 000 et 7 500 ans cal BP (Martin *et al.*, 2003 ; Angulo *et al.*, 2006) (figure IV.3-3), cette unité est caractérisée par une stabilité des valeurs des niveaux de gris de la radioscopie, témoignant d'une sédimentation principalement argileuse riche en MO, ce qui est attesté par l'augmentation du COT atteignant des valeurs maximales (1%). Cette augmentation de COT est accompagnée par une stabilité des valeurs de l'IO autour de valeurs minimales de 200 et une stabilité de celle de l'IH autour de 150. Ces variations sont

principalement dues à une fraction organique majoritairement terrestre attestée par les diagrammes de Van Krevelen et de COT-S2 (figures IV.3-1 et IV.3-2). Cette tendance est fortement suggérée par l'augmentation des n-alcanes de chaînes longues. Néanmoins, une contribution de plus en plus forte d'une fraction planctonique sur la partie la plus récente de cette unité semble être attestée : par la distribution des n-alcanes à chaînes courtes d'une part, ainsi que par les rapports C:N montrant de faibles valeurs (5) ; et par les rapports MO d'origine marine/MO d'origine terrestre d'autre part. Tous ces résultats géochimiques et pétrographiques convergent et plaident pour une augmentation progressive de la productivité primaire rendue possible grâce à la mise en place des conditions favorables à l'*upwelling*, comme l'attestent les données des associations de coccolithophoridés (Laslandes *et al.*, 2007), qui montrent une installation de nouvelles conditions océanographiques très favorables à la productivité primaire. Il est à noter que le pic de n-alcanes à longues chaînes associé à des valeurs de CPI bas traduit un événement abrupt et rapide d'apport de matériel terrigène et un état de dégradation important. Les TSM montrent le même comportement que dans l'unité sous-jacente, mais avec de plus grandes amplitudes. Les températures plus basses enregistrées au sommet de l'unité, associées à la teneur élevée en azote, et l'augmentation de concentration des n-alcanes courts, montrent la forte productivité phytoplanctonique, contrairement à ce qui a été enregistré à la base.

**Unité V** (95 - 15 cm ; 5 970 - 2 470 ans cal BP) : cette unité, comme la précédente, est argilo-organique et moins riche en carbone organique (autour de 0,8% de COT). Le diagramme COT-S2 montre deux types de matière organique : l'une de type III d'origine terrestre et l'autre de type II d'origine marine. Cette dernière est de plus en plus importante comme l'atteste la distribution des n-alcanes qui montre par la même occasion une diminution des longues chaînes. Cette tendance est aussi marquée par un rapport MO marine/MO terrestre qui montre une variation autour de valeurs assez élevées, proches de 10. Cette augmentation de la productivité primaire est confirmée par une augmentation des valeurs de l'IH à la faveur d'une amélioration de la préservation de la matière organique, attestée par les valeurs du CPI des chaînes

longues et courtes. Dans cette unité, on note également une fréquence plus importante de l'occurrence des alcanes à chaînes longues, plus marquée à la base qu'au sommet, témoignant, comme dans l'unité IV, d'événements d'apports terrigènes. Les températures de l'eau montrent une certaine stabilité de la structure océanographique, avec une réduction progressive vers le sommet, vraisemblablement liée à un renforcement de l'*upwelling* et de sa fréquence.



**Figure IV.3-3 :** L'évolution du niveau moyen de la mer confronté à la coupure lithologique (SCOPIX) de la carotte CF02-02A.

**Unité VI** (15 - 0 cm ; 2 470 - 2 040 ans cal BP) : à part le pic des n-alcanes à longues chaînes caractérisant un apport détritique important à la base de cette unité, elle est principalement caractérisée par les valeurs de COT les plus importantes, et dominée par une matière organique planctonique, comme cela est attesté respectivement par les diagrammes COT-S2 et IH-IO (pseudo Van Krevelen). Ces résultats traduisent probablement une intensification des conditions érosives sur le continent et aussi un *upwelling* favorable à la productivité primaire, ainsi qu'une meilleure préservation de la matière organique, comme l'attestent par ailleurs les valeurs de l'IH.

Martin *et al.*, (2003) et Angulo, *et al.*, (2006), ont montré que, dans la région Sudeste, l'eustatisme a atteint son niveau actuel à 8 000 ans cal BP (figure IV.3-3). C'est dans ces conditions de stabilité du niveau marin que les unités IV, V et VI ont été déposées chacune sous des conditions spécifiques de colonne d'eau et de climat. Pour mieux comprendre et mettre en évidence les différentes conditions environnementales traduites par la matière organique sédimentaire et le poids de chacun des paramètres utilisés dans la variabilité, nous avons décidé d'appliquer une méthode statistique en composante principale (ACP), présentée et discutée dans le chapitre final.

Après 8000 ans cal BP, des pics remarquables des n-alcanes longs sont observés au cours de la période de stabilité du niveau marin caractéristique des 3 dernières unités. En effet, on dénombre 6 pics de concentrations importantes dans les profils de ces n-alcanes. Ces derniers présentent un CPI très bas pendant ces événements (voisin de 1), qui montrent qu'il s'agit de matériels très dégradés. Ce matériel organique provient de végétaux supérieurs originaires d'une zone continentale dont les conditions climatiques sont relativement plus humides. Ceci est révélé grâce à l'indice ACL qui montre une réduction des longueurs moyennes des chaînes et des rapports C<sub>33</sub>:C<sub>29</sub> plus bas, se démarquant ainsi des valeurs qui caractérisent le reste de la carotte. Simultanément aux pics de n-alcanes longs, nous retrouvons en général des températures relativement plus chaudes et des proportions de ligno-cellulosiques opaques plus élevées. Ces caractéristiques indiquent un changement important de

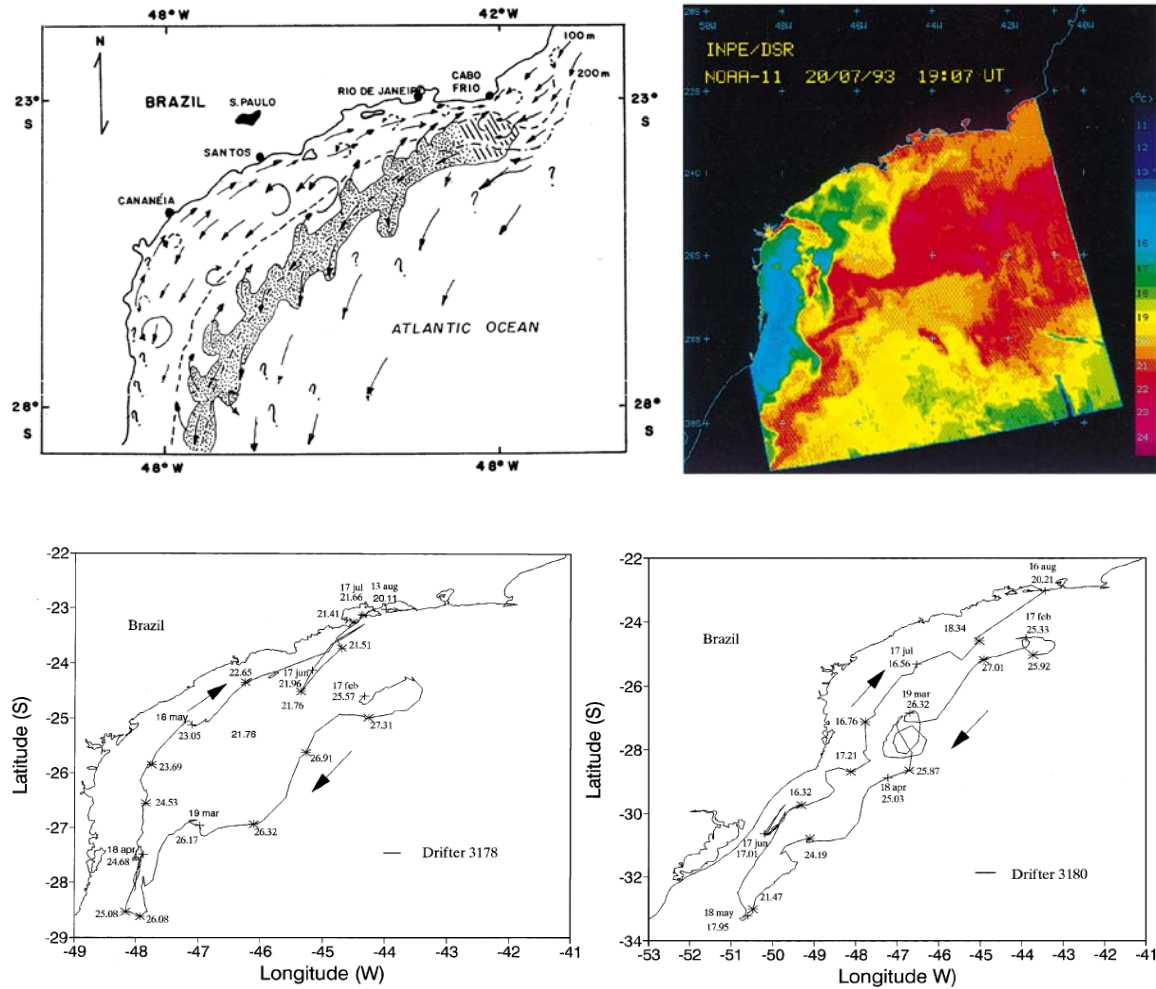
source de la MO, à mettre en relation avec des changements dans les systèmes de courants côtiers de la région. Contrairement aux conditions actuelles, les courants venant du sud, habituellement faibles et limités à des zones plus proches de la côte, auraient pris de l'ampleur et se seraient renforcés, amenant du matériel de la plateforme continentale située plus au sud, vers le Cabo Frio. Cette hypothèse est basée sur la distribution de la végétation et les conditions d'humidité qui prévalaient sur le continent, sur la distribution granulométrique des sédiments de surface de la plateforme (Mahiques et al., 2004), et sur les systèmes de courants observés sur cette même plateforme (Stevenson et al., 1998 ; Mesquita, 2000 ; Assirieu et al., 2003). En effet, les courants côtiers du prolongement sud de la plateforme de Cabo Frio longent la partie continentale brésilienne où siège la végétation de la forêt tropicale humide, la Mata Atlântica (ou forêt atlantique). Celle-ci se développe sur un relief montagneux très proche de la côte, avec une pluviosité importante enrichissant de nombreux cours d'eaux chargés de sédiments fins caractéristiques et qu'on retrouve sur la majeure partie de cette plateforme. La MO de ces sédiments, étant donné le caractère humide de leur milieu d'origine, présenteraient des ACL relativement bas.

Les apports événementiels en végétaux supérieurs, révélés par les analyses moléculaires et la pétrographie sur nos échantillons, sont probablement le résultat d'un remaniement sédimentaire de grande échelle. Ces remaniements se seraient produits pendant des périodes où des vents forts et tempétueux de secteur sud, renforcent les courants côtiers et provoquent ainsi la re-suspension et le transport des sédiments vers le Cabo Frio. Ce remaniement du matériel, sous une colonne d'eau oxygénée, peut dégrader le contenu organique de ces sédiments, ce qui expliquerait les valeurs basses du CPI retrouvé dans les échantillons représentant ces événements.

L'hypothèse d'un transport venant du nord est moins vraisemblable, car la plateforme possède un hydrodynamisme intense au nord de Cabo de Frio. De plus, les sédiments y sont plus grossiers et plutôt carbonatés. On note également une quantité d'embouchures fluviales plus faible. À tous ces points négatifs se rajoute le fait que la mata atlântica se trouve plus loin à l'intérieur des terres brésiliennes, dans une zone où la pluviosité réduit progressivement vers le nord.

Une troisième hypothèse serait le transport provenant du bassin du Rio Paraíba do sul. Ce dernier possède des caractéristiques de végétation et d'humidité similaires à celles de la côte sud de l'État de Rio de Janeiro, mais ne semble pas être la source de cette matière pour les raisons suivantes : tout d'abord, une grande proportion de LCO, composés de très petites particules bien fragmentées, indique plutôt un long séjour en environnement oxygéné et un hydrodynamisme faible (environnement correspondant plus à la plateforme sud). D'autre part, l'absence dans le palynofaciès de fractions terrestres fraîches telles que les LCA ou LCT ou même la MOAR montre qu'il ne s'agit pas de pulse fluviale.

L'hypothèse plausible du transport par le renforcement des courants côtiers du sud vers le nord de la plateforme est confortée par l'étude de la circulation océanique, à partir de dériveurs, dans cette région de l'Atlantique sud-ouest décrite par Stevenson *et al.* (1998) et Assirieu *et al.* (2003) (figure IV.3-4). Les observations montrent que les dériveurs lâchés au large de la côte sud de l'État de Rio de Janeiro, suivent les flux du courant du Brésil vers le sud jusqu'à environ 30°-32°S pour ensuite changer de direction, d'abord vers la côte et ensuite vers le nord. Cette dynamique est expliquée par Assirieu *et al.* (2003) comme un déplacement vers le nord de la zone de confluence des courants du Brésil et des Malouines « CBM » (de 36°S vers 30°S). En même temps, on assiste à une migration des températures de surface froides de l'océan et des pressions atmosphériques vers le nord, probablement le résultat d'une migration de l'anticyclone de l'Atlantique Sud (ASA) vers le nord-est, et par voie de conséquence la zone de convergence de l'Atlantique Sud (ZCAS) se retrouve sur une position plus septentrionale. Ces conditions peu fréquentes peuvent donc être favorables à un renforcement des vents de secteur sud au Cabo Frio. La multiplication d'événements climatiques de ce type dans le passé serait à l'origine des apports brusques et fréquents enregistrés dans les sédiments de la plateforme de Cabo Frio.



**Figure IV.3-4 :** Modèle de circulation de région de l'enfoncement sud brésilien proposé par Mesquita (2000) (en haut à gauche) ; les températures de surface de mer en 20/07/93 (en haute à droite) ; et les trajectoires observées de deux flotteurs/dériveurs du programme COROAS entre février et aout 1993, au large de côte SE du Brésil (Stevenson *et al.*, 1998 et Assirieu *et al.*, 2003) (en bas).

#### ***IV.4. Conclusions partielles***

Ce travail apporte de nouvelles connaissances sur l'évolution sédimentaire de la plateforme sud-est du Brésil. Jusqu'à là, cette évolution avait été étudiée par des méthodes indirectes (profils sismiques pour le remplissage sédimentaire), associées à des études de la distribution spatiale des sédiments superficiels et de quelques carottages courts. Si l'on excepte les études menées par la prospection pétrolière de la PETROBRAS dans le bassin de Campos, ce travail représente bien la première étude d'un enregistrement sédimentaire long prélevé dans cette région de la plateforme et étudié à haute résolution par le biais de l'analyse géochimique et pétrographique de la matière organique. La durée de la séquence étudiée permet d'inférer les conditions sédimentaires de la marge continentale océanique du *Sudeste* brésilien, depuis  $\approx 13\,000$  ans cal BP et ce jusqu'à  $\approx 2\,000$  ans cal BP de manière ininterrompue.

Nous avons pu mettre en évidence que les sédiments correspondant à la période 12 870 – 8 160 ans cal BP correspondant aux unités lithologiques basales I, II et III, ont été déposés sous le contrôle majeur du forçage climatique global, caractérisé essentiellement ici par la remontée du niveau de la mer. Ce forçage global masque les influences climatiques locales et /ou régionales. L'inondation progressive, avec l'apparition d'une colonne d'eau de plus en plus exprimée, a permis l'établissement des conditions propices à une sédimentation de granulométrie plus fine. Les variations dans la vitesse de montée du niveau marin sont à l'origine des variations observées du taux de sédimentation et de ce fait, à l'origine de la variabilité lithologique de la base, notamment s'agissant de la limite entre les unités I et II ( $\approx 10\,800$  ans cal BP) qui correspond au passage des sédiments grossiers carbonatés aux sédiments argileux suite au dernier pulse de déglaciation (mwp-1B, Fairbanks 1990).

Nous avons pu montrer que les fortes valeurs des divers marqueurs organiques terrestres s'expliquent par la proximité relative entre le rivage et le site de prélèvement (tranche d'eau faible), des conditions plus humides sur le continent et une embouchure du *Rio Paraíba do sul* probablement plus au sud que l'actuelle (vu les nombreux paléo-chenaux incisés sur la plateforme).



L'enregistrement organo-sédimentaire associé à l'upwelling sur le site, a vraisemblablement débuté vers 9 400 ans cal BP, période à laquelle la colonne d'eau devait présenter des conditions hydrodynamiques très proches de l'Actuel. L'expression maximale de l'upwelling a duré au total 2 600 ans, entre 8 600 et 6 200 ans cal BP, avec une large variabilité et une tendance moyenne constante (saisonnalité moins bien exprimée). La matière organique sédimentaire présente pendant cette époque un meilleur degré de préservation géochimique.

Un autre résultat important de ce travail est l'établissement - pour la première fois - d'une courbe qui reconstitue les températures superficielles de l'océan à cette latitude, sur la marge ouest de l'Atlantique sud, à partir de l'analyse des alcénones et de l'indice Uk<sub>37</sub>. Les températures obtenues fluctuent autour de 26°C et semblent enregistrer plus les variations dans la distance qui éloigne le courant du Brésil de notre site que les variations de l'intensité de l'upwelling lui-même. Ces enregistrements de TSM nous ont permis de différencier trois périodes. Une première période pendant laquelle le niveau marin était au plus bas. La température devient mesurable à partir de 11 200 ans cal BP. Ensuite une phase de réchauffement entre 10 400 et 9 000 ans cal BP accompagne la remontée du niveau marin. La période pendant laquelle la productivité phytoplanctonique était considérée comme maximale est marquée de fait par un refroidissement d'environ 3 °C entre 9 000 et 6 200 ans cal BP témoignant ainsi d'une bonne activité de l'upwelling. Ces mesures montrent qu'à partir de 5 600 ans cal BP, la température devient stable et reste dans les limites de la variabilité actuelle du courant du Brésil 25 - 27 °C.

A partir 6 000 ans cal BP, l'upwelling change de comportement : l'amplitude des fluctuations diminue mais la fréquence augmente (saisonnalité mieux exprimée) en allant vers le sommet de l'enregistrement sédimentaire ( $\approx$  2 000 ans cal BP). Ce changement de variabilité coïncide avec des modifications importantes dans le système de courants côtiers de la région de l'enfoncement sud brésilien, comme l'indiquent les marqueurs moléculaires. Ces modifications dues à des vents de secteur sud renforcés, sont possibles si la fréquence d'arrivée de systèmes des fronts froids augmente (ZCAS plus au nord). Cette hypothèse est en accord avec les observations courantologiques.

Ces périodes de renforcement de courants sont bien délimitées, et selon notre résolution analytique, sont confinées à l'Holocène supérieur, plus exactement à 6 800, 5 900, 5 700, 5 000, 3 600 et 2 200 ans cal BP.

L'upwelling de Cabo Frio est assez particulier par sa saisonnalité et par le type de sédiment, très rarement laminé, qu'on y observe. Les sources organiques de ces sédiments sont pour la plupart continentales avec toutefois un apport remarqué de production autochtone planctonique pendant l'Holocène supérieur. Pour la première fois, nous avons pu grâce aux indices moléculaires tracer le cheminement des fractions organiques et des sédiments qui les portent. Quelques événements particuliers liés aux renforcements des courants côtiers ont été mis en évidence et des scénarios climatiques à l'origine de ces événements ont été avancés.



## **V – Site Pacifique sud-est.**

Les effets de la bioturbation constituent l'une des principales limitations rencontrée dans l'étude de la variabilité des conditions océanographiques et climatiques à très haute résolution temporelle à partir des sédiments marins. Ainsi, il n'est qu'exceptionnellement possible d'obtenir des carottes marines qui permettent d'étudier la variabilité du climat à un pas de temps interannuel, ou qui soient susceptibles d'avoir enregistré des indices pertinents d'occurrence de variabilité interannuelle (événements El Niño) ou décennale (PDO, oscillation décennale du Pacifique). Ce sont des conditions d'anoxie poussées et permanentes qui rendent possibles une sédimentation laminée et une préservation ultérieure de ces sédiments à l'abri des phénomènes de bioturbation. De ce point de vue, plusieurs bassins sédimentaires localisés sur le plateau continental de la marge Pérou-Chili présentent un ensemble de conditions favorables pour la reconstruction à haute résolution de l'évolution océano-climatique des derniers milliers d'années.

L'est de l'Océan Pacifique, le long de la côte sud-américaine, est marqué par des conditions océaniques et climatiques très particulières. Les vents de l'Anticyclone du Pacifique Sud (branche orientale de l'anticyclone de l'Île de Pâques) qui soufflent le long des côtes d'Amérique du Sud, renforcés par le Courant de Humboldt de direction sud/nord, repoussent les eaux de surface vers le large, et induisent de nombreux centres de remontée d'eaux profondes. Ces cellules d'*upwelling* se succèdent tout au long des marges de l'Equateur, du Pérou et du Chili et font de ce littoral l'un des plus productifs au monde.

## ***V.1. Cadre environnemental***

### **V.1.1. Contexte général**

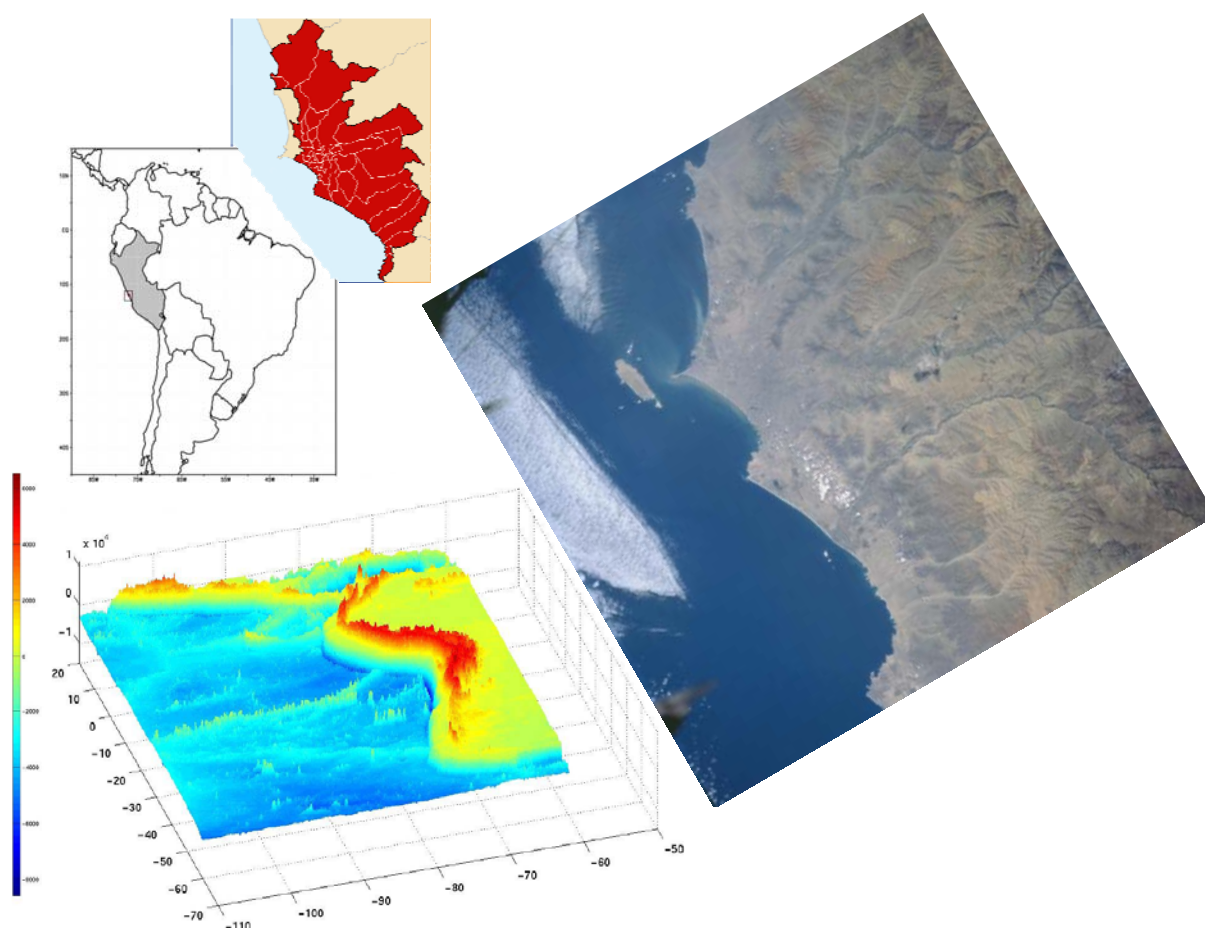
La plupart des caractéristiques morphologiques et structurales présentes au niveau de la plateforme centrale du Pérou se retrouvent plus au sud et au large du Chili, ce qui fait de cette zone, une zone représentative de la marge ouest de l'Amérique du Sud.

Callao est un cap situé dans la partie centrale de la côte péruvienne, à la même latitude que la ville de Lima (12°S, 77°W) (figure V.1-1). Le relief régional a été et est encore aujourd'hui, façonné par une tectonique très active, liée à la collision entre la plaque de Nazca et la plaque continentale Sud Américaine. Cette région de convergence, de type andin, est l'exemple classique d'une zone de subduction, une plaque lithosphérique océanique plonge sous une plaque continentale (OPD 112 Scientific Proposal). Les principaux caractères géologiques régionaux sont la Cordillère des Andes et la tranchée océanique.

De façon générale, le relief du Pérou est très abrupt : la cordillère des Andes, formée par un volcanisme d'arc, large de 300 à 400 km, couvre environ 28 % du territoire péruvien. Parallèle et proche de la côte, cette chaîne de montagne culmine à des hauteurs de plusieurs milliers de mètres (~6 800 m au mont Huascaràn). La plaine

côtière péruvienne est large de 75 à 100 km et représente 12 % du territoire. Elle est assez plate, s'étalant entre le niveau de la mer et une altitude d'environ 800 mètres. Le relief y est doux, bordant toute la côte du nord au sud. Cette zone côtière est interrompue par divers cours d'eau qui dévalent des vallées andines vers la plateforme continentale.

De la côte vers le large, on rencontre une plateforme continentale très étroite, très pentue et, par endroits, très réduite. Sa limite avec le talus continental est difficile à établir et fréquemment absente. Parallèlement et au-delà du talus, on rencontre un fossé océanique de profondeur équivalente à la hauteur de la cordillère ( $> 6\,000$  m) (figure V.1-1).

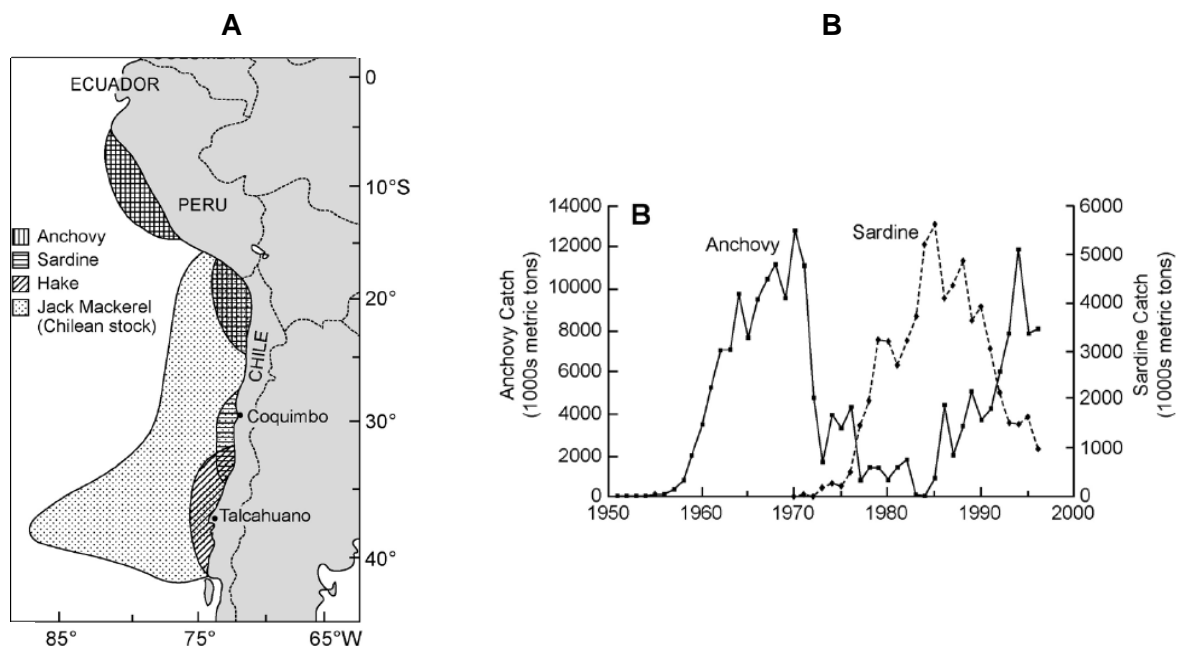


**Figure V.1-1 :** Localisation géographique du Pérou et de la province de Callao (entouré par la ville de Lima, en rouge dans le détail), modèle digital d'élévation de terrain de la côte SE Pacifique et Image satellite de la région de Lima (mai 1997).

**Source :-** topographie 3d - O. Pizarro & G. Yuras in Montecino *et al.*, 2005  
 - image satellite - [http://209.15.138.224/peru\\_maps/s\\_CalloArea.htm](http://209.15.138.224/peru_maps/s_CalloArea.htm)

La marge continentale active est le siège de fréquents séismes pouvant atteindre de fortes magnitudes. Historiquement, les récits parlent de déferlement de tsunamis (vagues géantes de l'ordre de 30 à 50 m) dérivés de grands séismes prenant place sous le plancher océanique. Les mouvements verticaux de l'embase rocheux ne sont pas négligeables à l'échelle géologique, la campagne en mer « Leg 112 » du Projet de carottage profond de l'océan (« *Ocean drilling programm* » – ODP) a étudié cette région en détail, et a estimé que les taux d'affaissement sont de l'ordre de 275 à 500 m\*M années<sup>-1</sup> pour le bassin de Lima (11°S). Ces taux sont moins importants à l'échelle des derniers millénaires.

Le système du Courant de Humboldt (SCH), qui borde les côtes du Pérou et du Chili, est la région la plus productive de l'océan mondial en matière de poissons (figure V.1-2). Les eaux au large du Pérou sont, au sein de ce système, parmi les plus fertiles en ressources halieutiques, la pêche de l'anchois devient l'un des principaux piliers de l'économie de ce pays.



**Figure V.1-2 : A - Localisation générale des zones de pêche des principales prises de la côte ouest Sud-Américaine (anchois, sardine, merlu, chinchard), et B - Historique des captures d'anchois et de sardines au Pérou et au Chili entre 1950 et 1996.**

La marge centrale du Pérou est caractérisée par un intense *upwelling*, le plus productif de la région. Cet *upwelling* est permanent, grâce au maintien des régimes annuels des vents qui favorisent la grande disponibilité de nutriments apportés par la remontée des eaux de sub-surface (50 à 150 m). Ces remontées induisent ainsi une forte productivité primaire de l'ordre de  $3\text{--}4 \text{ g C m}^{-2}\text{d}^{-1}$ .

La forte productivité primaire, associée à une forte décomposition des substances organiques dans la colonne d'eau et sur le fond, aboutissent à l'apparition d'une Zone à Minimum d'Oxygène (ZMO) ( $\text{O}_2 < 22 \mu\text{M}$  ou  $0.5 \text{ ml/l}$ ) entre 100 et 500 m au-dessous des cellules d'*upwelling* (Zuta *et al.*, 1978). La ZMO, commune à la majorité des systèmes d'*upwelling*, est considérée au large du Pérou comme l'une des plus intenses et moins profondes du globe. Ces environnements sont très particuliers, aussi bien au niveau de l'écologie des communautés pélagiques et benthiques que pour les processus biogéochimiques.

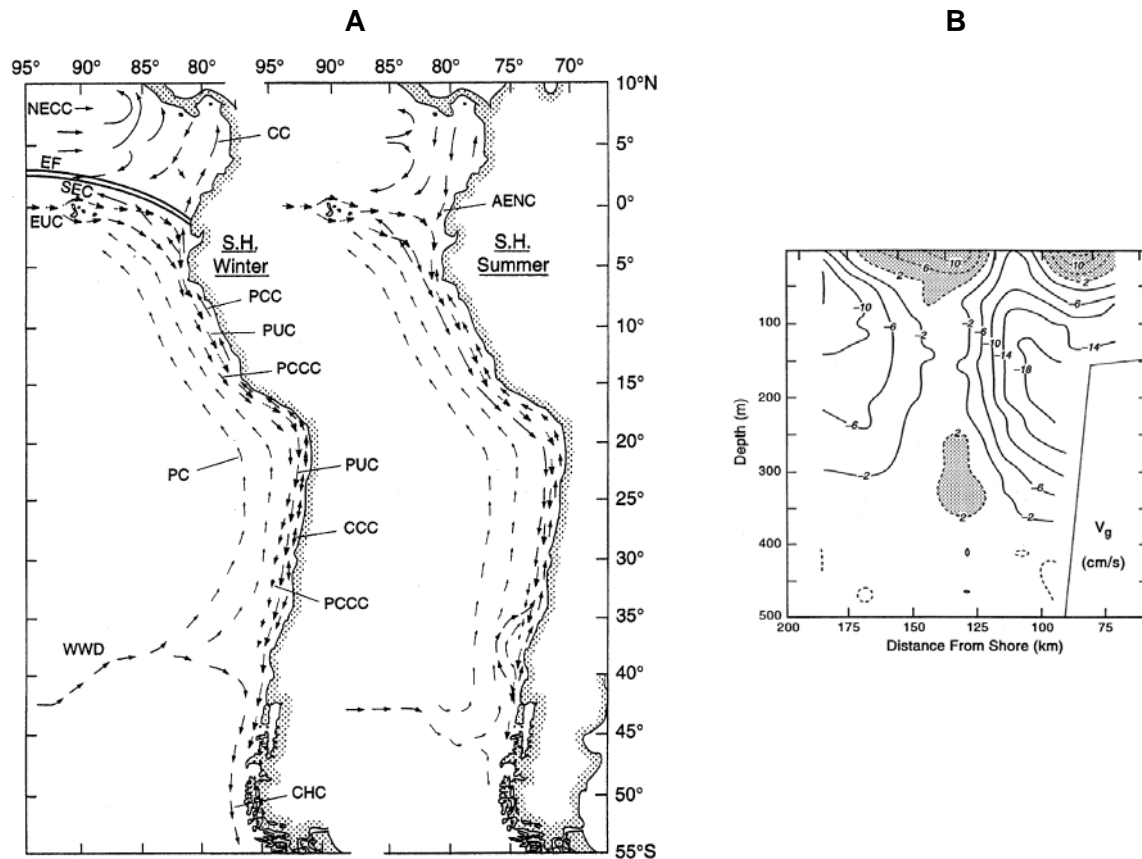
### V.1.2 Circulation océanique de la région

La circulation générale du secteur sud-est de l'océan Pacifique (figure V.1-3A) montre que le courant du Pérou (PC) prend naissance dans la branche qui se dirige vers l'équateur, lors de la bifurcation du courant de dérive du vent ouest (WWD), autour de  $40^\circ\text{S}$ . Le PC circule parallèlement à la côte, très au large, jusqu'à l'équateur où il dévie vers l'ouest et devient le courant sud équatorial (SEC). D'après Strub *et al.* (1998), la circulation au large du Pérou et au nord du Chili est dominée par des courants de surface de direction sud, à l'inverse de ce qui est normalement attendu pour les courants de bord est (circulation vers le nord). Au niveau de l'équateur, le courant équatorial sub-superficiel (EUC) se dédouble au niveau des Îles Galápagos. La branche qui passe au nord des îles donne naissance au courant sub-superficiel qui flue vers le pôle (PUC), et la branche sud donne elle naissance au contre-courant du Pérou-Chili (PCCC). Le PUC, aussi connu sous la dénomination de courant de Gunther,



évolue sur le talus et la plateforme continentale externe, atteint son maximum de vitesse en profondeur (150–200 m) ; son eau est génériquement plus saline, plus riche en nutriments et plus pauvre en oxygène que les eaux environnantes. Le PCCC se trouve très au large, entre 100 et 300 km du rivage (figure V.1-3B). Entre le PUC, le PCCC et la ligne de côte circulent les courants côtiers superficiels du Pérou (PCC) et du Chili (CCC), qui coulent en direction de l'équateur. Ce sont ces derniers courants qui sont associés aux systèmes d'*upwelling* côtiers.

Les caractéristiques de la circulation au large du Pérou pour les périodes normales (de non El Niño) sont bien résumées par Strub *et al.* (1998). Ces caractéristiques sont : 1. la structure côte-large des écoulements océaniques, qui consiste en courants superficiels (20–30 m) dirigés vers le large et en contre-flux, en profondeur, vers la côte, en accord avec la théorie d'Ekman. Lors des périodes de vents intenses, les eaux remontées par l'*upwelling* proviennent de profondeurs comprises entre 50 et 150 m, dont les centres majeurs ont été identifiés à 6°, 9°, 12° et 15°S. Ces eaux ainsi remontées sont déplacées des centres d'*upwellings* vers le large (en direction ouest) formant des plumes d'eaux froides de 25 à 50 km d'extension qui se contractent lors des périodes d'affaiblissement des vents (périodicité de 3 à 10 jours) ; 2. les écoulements parallèles à la côte, qui sont principalement dominés par des flux en direction du pôle sud, quoiqu'une mince couche superficielle (25-50 m) présente un flux vers l'équateur sur la plateforme continentale; 3. et enfin le cycle saisonnier de la circulation superficielle, qui est moins bien défini et faible au nord des 20°S ; néanmoins les cycles de flux de chaleur en surface et la stratification de la couche supérieure de l'océan y sont plus fortes.



**Figure V.1-3 :** **A** – Courants océaniques du secteur sud-est de l’océan Pacifique ; **B** – Section côte-large à 10°S montrant le flux géostrophique, après l’El Niño de 1982-1983. Les courants qui fluent vers l’équateur sont indiqués par des lignes pointillées.

NECC – contre-courant équatorial nord  
 CC – courant de la Colombie  
 EF – front équatorial  
 SEC – courant équatorial sud  
 EUC – courant sub-superficiel équatorial  
 PCC – courant côtier du Pérou  
 PUC – courant sub-superficiel en direction du pôle sud

PCCC – contre-courant Pérou-Chili  
 PC – courant du Pérou  
 CCC – courant côtier du Chili  
 WWD – courant dérive du vent ouest  
 CHC – courant du Cap Horn  
 AENC – courant annuel d’El Niño

**Source :** Strub *et al.* (1998).

### V.1.3. Origine et caractéristiques des eaux marines

#### V.1.3.1 Les masses d'eau

Strub *et al.* (1998) ont remarqué une grande diversité des définitions et des limites employées par divers auteurs pour caractériser les masses d'eaux. L'étendue de la région et la difficulté d'identification en diverses localités y contribuent beaucoup. Nous retiendrons ici les définitions des eaux de surface établies par Wyrski (1966) et Enfield (1966), et reprises par Strub *et al.* (1998), pour la région comprise entre 15°N et 15°S.

- *Eau Tropicale de Surface* (ETS;  $T > 25^{\circ}\text{C}$  ;  $S < 33,5$ ) : on la rencontre généralement au nord de l'équateur. Les basses salinités qui la caractérisent sont dues aux précipitations plus importantes provoquées par l'influence de la zone de convergence inter-tropicale (ZCIT) ;
- *Eau Subtropicale de Surface* (ESS ;  $20^{\circ}\text{C} < T < 28^{\circ}\text{C}$  ;  $S > 35$ ) : au sud de 4°S, où les taux de radiation et d'évaporation élevés sont à l'origine de salinités élevées ;
- *Eau Côtière du Pérou* (ECP ;  $T < 19^{\circ}\text{C}$  ;  $33,5 < S < 35,0$ ) : elle est formée par le mélange entre des remontées d'eaux plus froides et moins salines et les ESS. On la rencontre sur une large superficie au large de la côte péruvienne ;
- *Eau Équatoriale de Surface* (EES ;  $20^{\circ}\text{C} < T < 24^{\circ}\text{C}$  ;  $33,5 < S < 35$ ) : elle est formée par le mélange entre l'eau côtière péruvienne, l'ESS, et l'eau tropicale superficielle. On la trouve en temps normal en une bande latitudinale étroite, entre 3°N et 4°S.

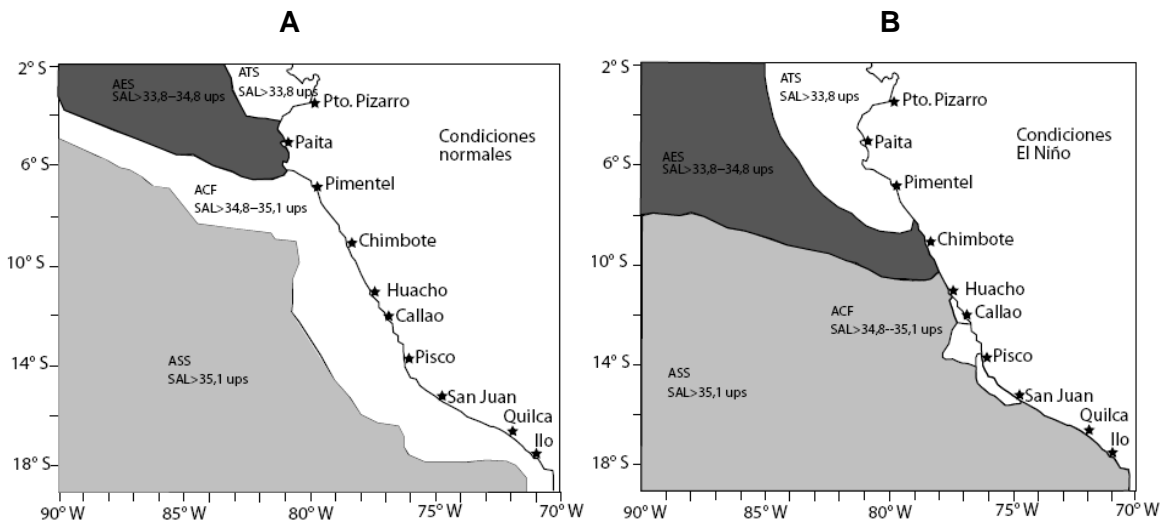
Selon Strub *et al.* (1998), l'*Eau Subtropicale de Sub-Surface (ESSS)* présente une salinité supérieure à 35 mg/l et elle est associée au courant de sub-surface équatorial. Au sein de ce courant, le maximum de salinité est accompagné d'un maximum relatif d'oxygène dissous et d'un minimum de nutriments. Au large de l'Équateur, du Pérou et du Chili en revanche le maximum de salinité porté par le sous-courant en direction du pôle est accompagné d'un minimum d'oxygène et d'un maximum de nutriments.

Graco *et al.* (2007) présentent une compilation actualisée de ces masses d'eau rencontrées au large du Pérou (tableau V.1-1 et figure V.1-4), dont les définitions et les extrêmes diffèrent légèrement de ceux présentés par Strub *et al.* (1998).

**Tableau V.1-1** : Propriétés des masses d'eau au large de la côte péruvienne.

Masse d'eau	Profondeur (m)	Température (°C)	Salinité (psu)	Caractéristiques
<i>Eaux tropicales superficielles (ETS)</i>	0 - 20	> 25°	< 33,8	Minimum absolu de salinité
<i>Eaux équatoriales superficielles (EES)</i>	0 - 30/40	> 20°	33,8 - 34,8	Minimum relatif de salinité
<i>Eaux subtropicales superficielles (ESS)</i>	0 - 100	18° - 27°	35,1 - 35,7	Maximum relatif de salinité et maximum relatif d'oxygène
<i>Eaux sub-antarctiques (ESSA)</i>	0 - 100	13° - 15°	34,6 - 34,8	Minimum relatif de salinité, maximum relatif d'oxygène
<i>Eaux équatoriales sub-superficielles (ESSS)</i>	50 - 300	13° - 15°	34,9 - 35,1	Maximum relatif de salinité, minimum d'oxygène
<i>Eaux équatoriales profondes (EEP)*</i>	150 - 700	7° - 13°	34,6 - 34,9	
<i>Eaux intermédiaires antarctiques (EIA)</i>	600 - 1000	4° - 7°	34,45 - 34,6	Minimum absolu de température, minimum de salinité

\* Définies par Zuta & Gillén (1970) d'après Graco *et al.* (2005)



**Figure V.1-4:** Schéma de distribution des masses d'eau superficielles au large de la côte péruvienne: **A** – en périodes normales, et **B** – en périodes El Niño.

**Légende :** *ATS* : eaux tropicales superficielles ; *AES* : eaux équatoriales superficielles ;  
*ACF* : eaux côtières froides ; *ASS* : eaux subtropicales superficielles.

**Source :** Morón & Sarmiento (1999) in Graco *et al.* (2007).

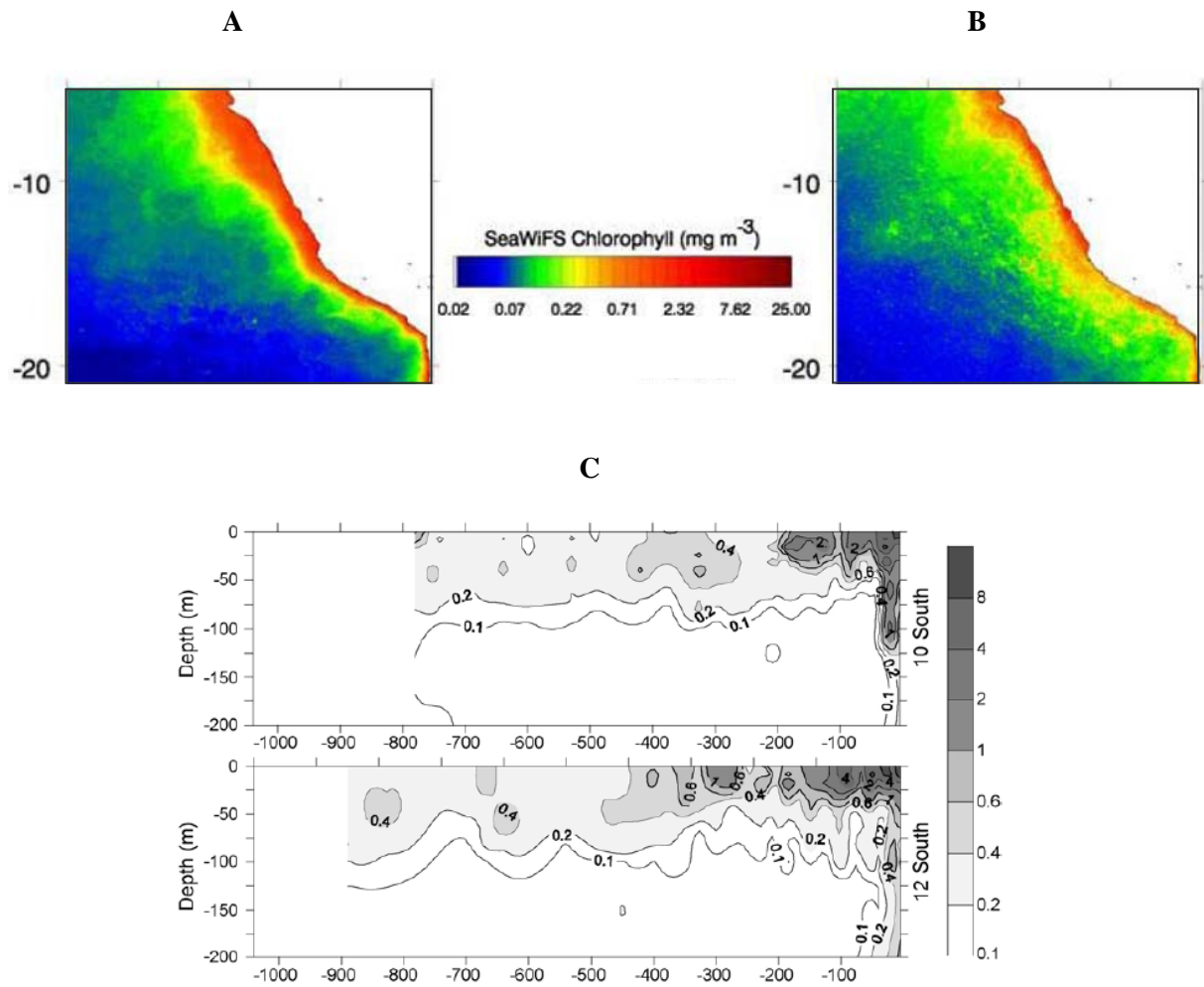
En profondeur, on trouve dans la région, selon Strub *et al.* (1998), les masses d'eau suivantes :

- *Eau Subtropicale de Surface* (ESS ;  $T > 18,5^{\circ}\text{C}$  ;  $S > 34,9$ ) : entre 12 et 35 m de profondeur, proche de la côte. Elle est en général plus froide et légèrement moins salée que celle rencontrée au large du Pérou ;
- *Eau Sub-Antarctique* (ESA ;  $11,5 < T < 14,5^{\circ}\text{C}$  ;  $34,1 < S < 34,8$ ) : rencontrée entre 20 et 50 m de profondeur (100 m, d'après Blanco *et al.*, 2001) au niveau de la côte et plus en profondeur encore au large ;
- *Eau Equatoriale de Sub-Surface* (EESS ;  $8,5^{\circ}\text{C} < T < 10,5^{\circ}\text{C}$  ;  $34,4 < S < 34,8$ ) : généralement rencontrée en profondeur entre environ 300 et 370 m, proche de la marge. Comme nous l'avons décrit précédemment, elle est associée au sous-courant qui flue en direction du pôle sud, au large de la côte. Pauvre en oxygène dissous ( $< 0,25 - 0,5 \text{ ml}\cdot\text{l}^{-1}$ ), elle atteint la surface lors des événements d'*upwelling* ;

#### IV.1.3.2 La productivité primaire régionale et la zone de minimum d'oxygène

La marge centrale du Pérou est caractérisée par un intense *upwelling*, le plus productif de la région. La productivité phytoplanctonique y est en moyenne très élevée ( $> 200 \text{ g C.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ ; Levin *et al.*, 2003), avec des pics de productivité primaire dans les zones de remontée. Hendrikson *et al.*, (1982) et Montecino *et al.* (2005) montrent que cette productivité primaire est plus importante dans la zone la plus proche de la côte, et qu'elle diminue vers le large. Les auteurs postulent des valeurs moyennes de productivité variant entre 3,7 et 5,5  $\text{g C m}^{-2}\text{d}^{-1}$  au large du Pérou. Chavez *et al.* (1989) quant à lui estime, pour la période de 1975 à 1987, que cette productivité primaire se situe autour de 3,2  $\text{g C m}^{-2}\text{a}^{-1}$  qui correspond à 1,2  $\text{kg C m}^{-2}\text{an}^{-1}$ . Ces auteurs montrent aussi que cette productivité est essentiellement dominée par des diatomées près des côtes et des dinoflagellés et des ciliées plus au large. Les associations des diatomées sont essentiellement représentées par les espèces de *Chaetoceros*, alors que celle des ciliées est représentée par *Lohmanniella oviformis* dont la biomasse représente de 2 à 9% du COP. Quant à la biomasse bactérienne, avec environ  $2 \times 10^6 \text{ cellules.m}^{-1}$ , elle correspond à 6% du COP.

Cette grande productivité biologique provoque un intense flux de particules vers le fond qui, en se décomposant dans la colonne d'eau, ce qui nécessite un taux élevé de consommation d'oxygène, réduit encore la concentration de ce dernier, déjà faible, dans la masse d'eau équatoriale de sub-surface. Ce phénomène amène ainsi à une mise en place et à une intensification de la ZOM. Cette ZOM péruvienne est caractérisée par une couche déficiente en oxygène  $< 0.5 \text{ ml.l}^{-1}$  qui se développe à partir de 30-50m de profondeur. Elle correspond à la ZOM la moins profonde de la planète dont le noyau de minimum absolu de concentration d'oxygène, inférieur à  $0,25 \text{ ml.l}^{-1}$ , varie entre 50 et 450/500 m.



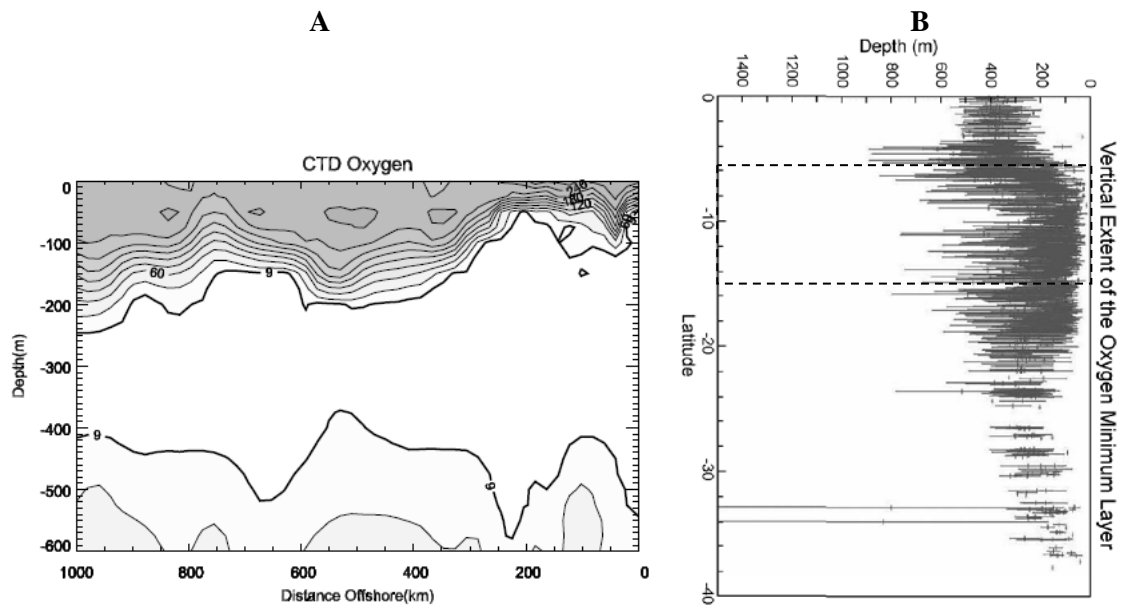
**Figure V.1-5:** Concentrations de Chlorophylle-a à la surface de la mer, estimées à partir des données collectées pendant les cinq premières années de mesures satellitales SeaWiFS.

**A** – période d’été austral (décembre à février) ;

**B** – période d’hiver austral (juin à août).

**C** – profil de concentration de Chlorophylle-a transversale à la plateforme pérouvienne ( $10^\circ$  et  $12^\circ\text{S}$ ). Exprimés en  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

**Source :** Montecino *et al.* (2005)



**Figure V.1-6 :** **A** - Section vertical de teneur en oxygène ( $\mu\text{M}\cdot\text{Kg}^{-1}$ ) le long des  $14,5^\circ\text{S}$ . La ligne de  $30 \mu\text{M}\cdot\text{Kg}^{-1}$  correspond à approximativement  $0,7 \text{ ml}\cdot\text{l}^{-1}$ . Il est notable que les valeurs inférieures à  $9 \mu\text{M}\cdot\text{Kg}^{-1}$  ( $0,2 \text{ ml}\cdot\text{l}^{-1}$ ) s'étalent entre 50 et 500 m ;  
**B** - distribution latitudinale de l'épaisseur de la ZOM ( $\text{O}_2 < 0,5 \text{ ml}\cdot\text{l}^{-1}$ ) sur la marge ouest de l'Amérique du Sud ;  
 Le rectangle en pointillé indique la côte péruvienne.

Source : Montecino *et al.* (2005)

## V.1.4. Le système climatique régional

### V.1.4.1 Contexte climatique général

Le Pérou, par sa position géographique, devrait posséder un climat tropical avec des précipitations en abondance, des températures élevées et une végétation exubérante. Toutefois, la présence de la Cordillère des Andes et les influences conjointes du courant de Humboldt et de l'anticyclone du Pacifique Sud, modifient le climat attendu et provoquent de grands écarts climatologiques dans ces régions. Les



conditions climatiques correspondant à situation géographique ne se retrouvent en fait que dans la partie amazonienne du Pérou, à l'est de la Cordillère.

La chaîne de montagne près de la côte et les falaises influencent certes les vents côtiers et les précipitations (Rutland *et al.*, 1998). Les bilans de tension des vents, de chaleur et d'eau douce de la côte ouest sud-américaine, sont affectés par les mouvements de la zone de convergence inter-tropicale (ZCIT) et par les Alizés dans la partie nord, et par la zone de haute pression du Pacifique Sud aux latitudes moyennes (Montecinos *et al.*, 2005).

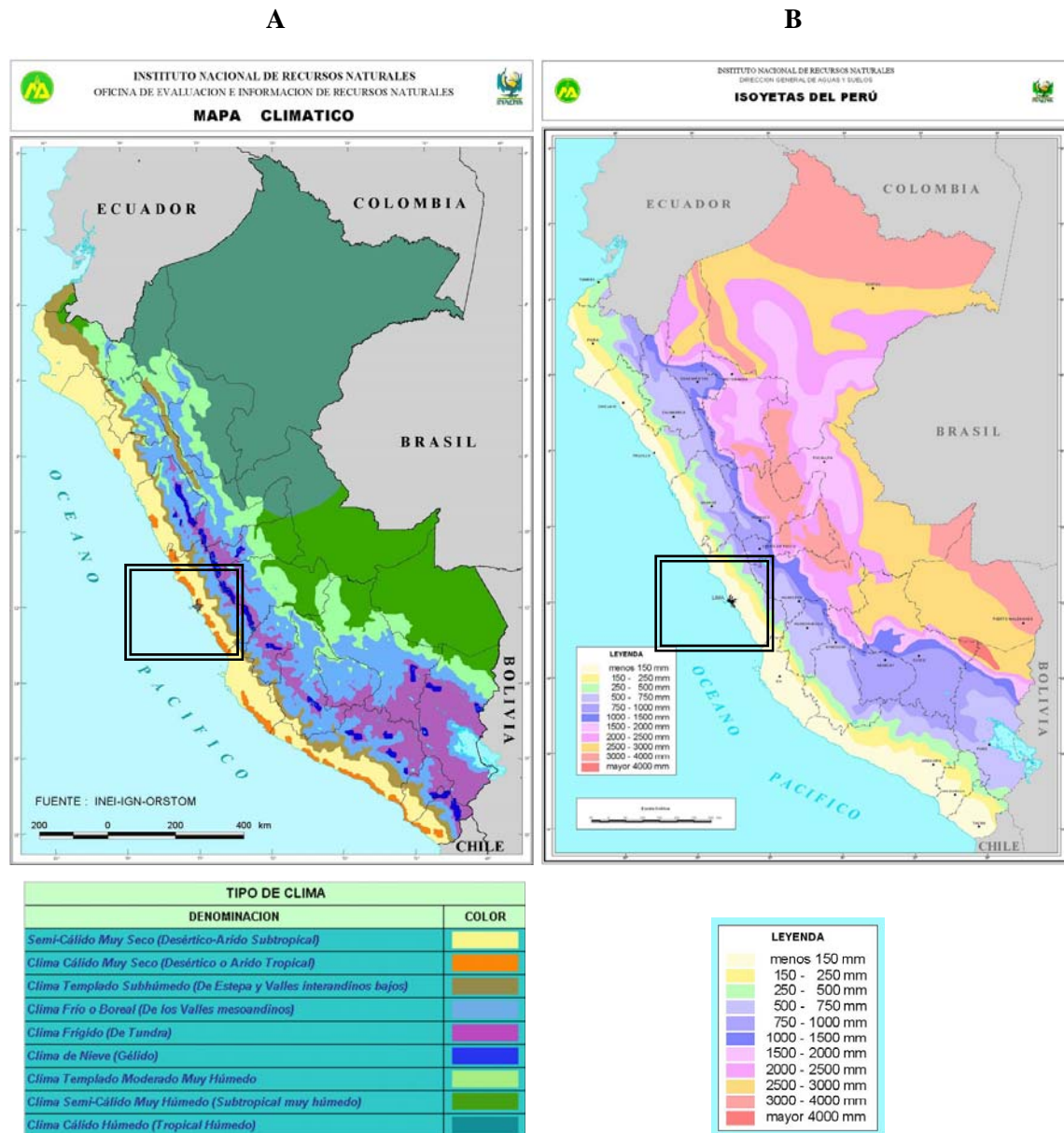
La zone côtière du Pérou est caractérisée par de faibles précipitations, autour de 40-50 mm\*an<sup>-1</sup>, et une température qui oscille entre 18 et 20°C. La Cordillère a un climat qui évolue de tempéré sub-humide, au pied des montagnes, à boréal ou de toundra sur les sommets, caractéristiques des hautes montagnes. La précipitation y varie entre 100 à 1000 mm\*an<sup>-1</sup> et la température fluctue autour de 10°C durant toute l'année, du fait du relief et de l'altitude. Les figures V.1-7A et B montrent les cartes climatiques et pluviométriques du territoire péruvien : les trois grandes régions climatiques péruviennes (côte, Cordillère, forêt), apparaissent nettement. Les tableaux V.1-2A et B ont été publiés par Galvez et Arévalo *in* Ordoñez & Vera (2005).

**Tableau V.1-2 A :** Caractéristiques topographiques, températures et pluviométrie des grandes régions naturelles du Pérou.

Région	Altitude (m)	Température moyenne annuelle (°C)	Précipitation moyenne annuelle (mm)
Côte	0 – 500	18 – 20	40
Cordillère	500 – 6 780	8 – 11	600
Forêt Amazonienne	400 – 1 000	24	3 000 – 4 000

**Tableau V.1-2 B :** Bilan hydrique des grands bassins versants péruviens, entre 1969 et 2000.

Bassin versant	Température moyenne annuelle (°C)	Précipitation moyenne annuelle (mm)	Évapotranspiration moyenne annuelle (mm)	Disponibilité hydrique (mm)
Pacifique	16,6	274	826	16
Atlantique	23,0	2061	1344	2697
Lac Titicaca	8,9	813	590	130

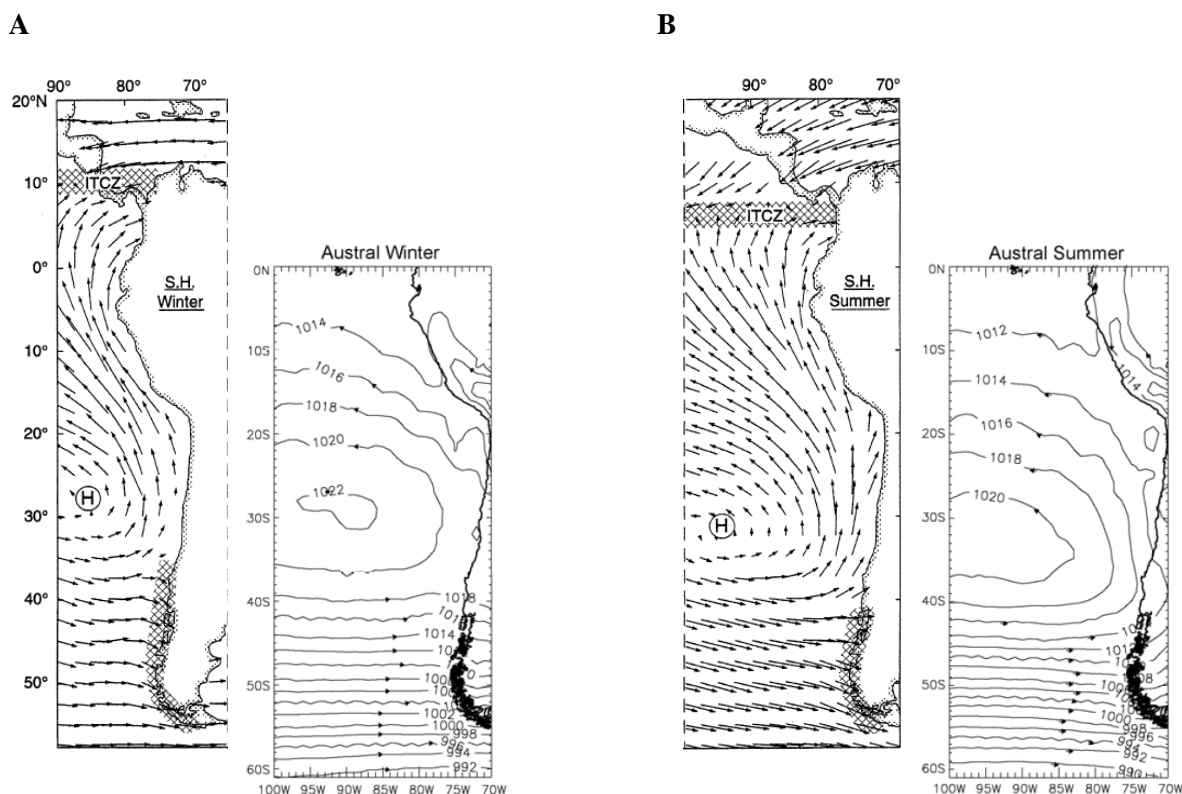


**Figure V.1-7 : Cartes des climats (A) et de pluviométrie (B) du Pérou.**

**Source :** [http://www.inrena.gob.pe/biblioteca/biblio\\_peru\\_ambiental.htm](http://www.inrena.gob.pe/biblioteca/biblio_peru_ambiental.htm)

En plus de la variabilité saisonnière du déplacement de la ZCIT, le climat de la côte ouest de l'Amérique du Sud est affectée par la variabilité de l'anticyclone subtropical de l'océan Pacifique SE (figure V.1-8). Cet anticyclone oriente et dirige les vents vers l'équateur le long des côtes péruviennes et équatoriennes. L'anticyclone est limité au nord par la ZCIT, au sud par le front polaire et à l'est par la Cordillère des Andes (Strub *et al.*,

2005). Entre 4°S et le Chili central les vents favorables à l'*upwelling* soufflent durant toute l'année. Les vents qui longent la côte sont plus intenses au large, ce qui est à l'origine de la formation d'une bande de tension de vents cycloniques, entre 50 et 200 km du rivage, qui favorise l'*upwelling* océanique et un flux de Sverdrup vers le pôle sud.



**Figure V.1-8 :** Le vent climatologique à 1 000 mb (à droite), et la pression atmosphérique au niveau de la mer (à gauche), pendant l'été (A) et l'hiver (B) australs. Les moyennes saisonnières ont été obtenues à partir de ré-analyses NCEP (National centers for environmental prediction – EUA). Les parties hachurées correspondent à des zones de très fortes précipitations.

**Source :** vent – Strub *et al.* (1998) ; pression – Montecino *et al.* (2005) ;

Les déplacements saisonniers de la ZCIT sont bien ressentis de l'Équateur au Pérou (0° - 15°S). Pendant l'automne et l'hiver australs, son déplacement vers le nord donne lieu à l'expression maximale des vents, surtout pendant le mois d'août au large du Pérou, vents favorables à l'*upwelling* par contraction vers les côtes, suivant une direction nord-est, de l'anticyclone du Pacifique sud. La migration de la ZCIT vers le sud, pendant l'été austral, crée un maximum de précipitations au niveau de l'équateur,

qui diminue en allant vers le sud (Montecino *et al.*, 2005). Du fait de ce déplacement, l'anticyclone du Pacifique sud aussi se déplace, vers le sud-ouest (Strub *et al.*, 1998).

Le réchauffement des zones désertiques placées devant les plus importants centres d'*upwelling* crée des zones dépressionnaires semi-permanentes le long des côtes du Pérou et du Chili. Au Pérou, ces zones de basse pression se trouvent entre 6° et 14°S, où l'aridité élevée et le ciel en permanence dégagé créent des vents forts qui longent la côte (du fait du gradient océan-continent de température et de pression). Or, comme ces vents réduisent la température de surface de l'océan, à travers le renforcement de l'*upwelling*, ils augmentent ainsi le contraste de température et de pression entre l'océan et le continent. Cette boucle et les effets de rétroaction associés montrent bien qu'il s'agit d'exemples de très forte interaction air - mer - continent au niveau de ces zones, comme décrit par Rutland (1990) et par Strub *et al.*, 1998.

#### **V.1.4.2. Les variabilités climatiques du Pacifique**

Les normales climatiques du Pérou sont fortement influencées par la variabilité de famille El-Niño / La-Niña / Oscillation Sud, à l'échelle pluri-annuelle.

À l'échelle inter-annuelle, les événements El-Niño causent un approfondissement important de la thermocline, de la nutricline et de l'oxycline au large du Pérou. Ce fait module donc tous les autres cycles océanographiques et climatiques.

Dans les régions tropicales, en l'absence d'un véritable hiver thermique, la pluviométrie est le critère climatique primordial. Il est donc évident que les paramètres qui semblent les plus intéressants à considérer sont la plus ou moins grande abondance des précipitations, leur répartition dans l'espace et dans le temps, ainsi que les variabilités qui les affectent. La dynamique du climat en Amérique du sud tropicale est contrôlée par les mouvements saisonniers de la Zone de Convergence (ZCIT), auxquels se superpose l'influence des anticyclones Pacifique et Atlantique. Par ailleurs, cette dynamique présente une forte réponse aux anomalies de température des eaux de

surface atlantique et pacifique, notamment aux événements *El-Niño* Oscillation Sud (*El-Niño / South Oscillation - ENSO*), Oscillation Décennale Pacifique (*Pacific Decadal Oscillation - PDO*), Variabilité Atlantique Tropicale (*Tropical Atlantic Variability - TAV*), Dipôle Atlantique Sud (*South Atlantic Dipole - SAD*) et Oscillation Multidécennale Atlantique (*Atlantic Multidecadal Oscillation - AMO*) aux échelles interannuelles, décennales à multi-décennales.

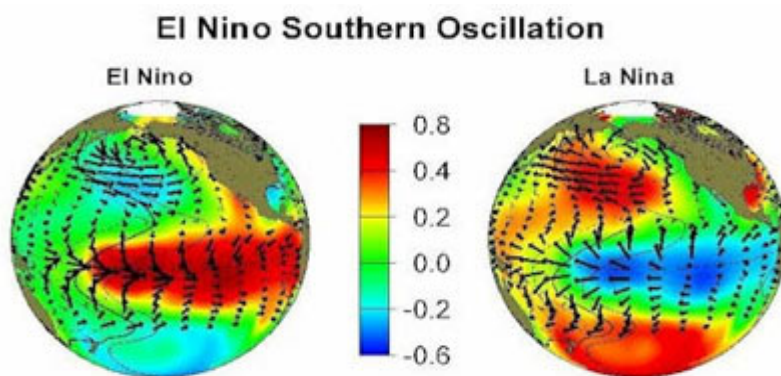
**Tableau V.1-1 :** Exemples de variabilités qui influencent le continent sud-américain, leur zone source et périodicité associée.

Variabilité	Zone	Périodicité
<i>ENSO</i>	<i>Pacifique</i>	<i>3-7 ans</i>
<i>PDO</i>	<i>Pacifique</i>	<i>20-30</i>
<i>TAV</i>	<i>Atlantique tropicale</i>	<i>15-20</i>
<i>SAD</i>	<i>Atlantique sud</i>	<i>14-16</i>
<i>AMO</i>	<i>Atlantique nord</i>	<i>50-70</i>

Sur notre planète, la majorité de la chaleur est stockée par les océans. Ces derniers retiennent plus facilement l'énergie que les continents, et bien plus que l'atmosphère. L'océan joue donc un rôle aussi important que l'atmosphère sur le climat. Dans le Pacifique tropical, les variations irrégulières des températures de la surface de la mer (TSM) qui se produisent, l'ENSO, provoquent des perturbations locales et ont des effets climatiques. Les deux phases de ce phénomène sont *El-Niño* et *la-Niña* (figure V.1-9).

**La « confrérie » El-Niño :** *El-Niño* fut connu le premier, observé déjà par les communautés préhispaniques sur les côtes pacifiques de l'Amérique du Sud. C'est le mode dominant global de variabilité du climat aux échelles interannuelles. En conditions normales, plus la pression est basse près de l'Indonésie et de l'Australie et élevée près de l'Île de Pâques, et plus les Alizés, balayant le Pacifique tropical de l'est vers l'ouest, sont importants. L'eau chaude de la surface du Pacifique de l'ouest est accumulée par ces vents, ce qui fait que la surface de la mer est d'environ 50 cm plus

haute et que la thermocline est plus basse près de l'Indonésie qu'en Équateur. Mais quand la pression augmente fortement près de l'Indonésie et de l'Australie et diminue près de l'Île de Pâques (au Chili), nous avons une anomalie du vent d'ouest dans le Pacifique central et les Alizés faiblissent. Les eaux chaudes de la surface sont alors entraînées vers l'est. La couche superficielle s'amincit en amont et s'enfonce en aval. (figure V.1-10) Vers l'est, cet enfoncement s'équilibre par les ondes de Kelvin qui se propagent rapidement ( $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Au bout de trois mois, lorsqu'elles arrivent près des côtes occidentales, ces ondes empêchent la remontée des eaux froides. L'enfoncement de la thermocline à l'est se répercute directement sur la température de la surface qui augmente. L'air est alors réchauffé par l'augmentation de la température de l'océan.



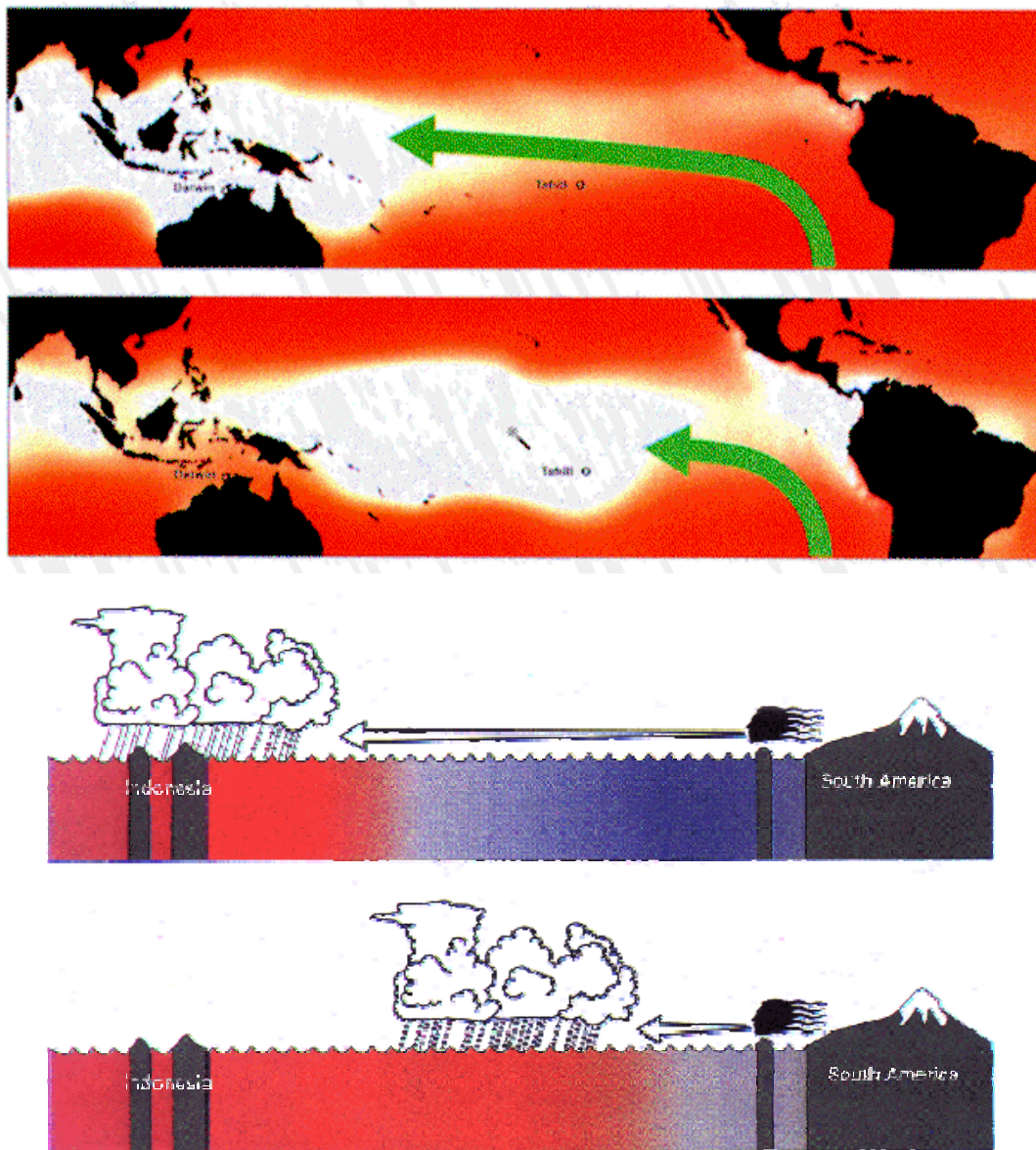
**Figure V.1-9 :** Les températures de surface de l'Océan Pacifique équatorial, qui caractérisent les phases positives chaudes (El-Niño) et les phases négatives froides (La-Niña) de l'oscillation ENSO

Ce phénomène a des incidences régionales et globales conséquentes. Les eaux sont moins chaudes en Indonésie, des anticyclones se créent donc à la place des dépressions causant des sécheresses en Australie et en Indonésie, voire des incendies de forêts dans des zones qui ont d'habitude des précipitations abondantes. Les cyclones cependant sont moins nombreux à l'ouest du Pacifique. eaux + chaudes entraînées vers est long de l'équateur provoquent une baisse de la pression atmosphérique, donc une augmentation des précipitations sur la côte est de l'Amérique du sud (surtout au nord du Brésil, au Pérou), voire d'importantes inondations dans des régions habituellement désertiques.

*La-Niña* un phénomène qui est tout l'opposé d'*El-Niño* et a donc des conséquences opposées. La survenue de ce phénomène dépend de la réflexion des ondes océaniques sur les côtes indonésiennes ou de l'Amérique du sud. Quand les ondes de Kelvin se réfléchissent sur les côtes de l'Amérique du Sud en ondes de Rossby vers l'ouest, la thermocline remonte à l'est du Pacifique et descend à l'ouest. La température de la surface de l'océan varie alors. L'eau froide de la thermocline qui remonte, refroidit le Pacifique de l'est, ce qui cause une instabilité du couplage atmosphère-océan. Les Alizés soufflent plus fort, poussant les eaux chaudes de la surface vers l'Indonésie et l'Australie ce qui permet la remontée des eaux froides à la surface. Ces anomalies de la température de la surface du Pacifique renforcent les dépressions de l'Indonésie et de l'Australie et les anticyclones du Pacifique de l'est.

Ses conséquences sont aussi importantes que celles d'*El-Niño*, les eaux en Indonésie se réchauffent peu à peu, atteignant 29°C, et le niveau de la mer s'élève de 40 cm sur les bords ouest du bassin. Ceci amplifie les précipitations au sud-est de l'Asie et à l'est de l'Australie et cause d'importantes inondations. Les moussons sont aussi anormalement fortes en Inde. L'Afrique du Sud connaît aussi des précipitations plus importantes. Les îles intertropicales du Pacifique Central cependant et la côte est du Pacifique, soit le sud de l'Amérique du Nord, le nord du Mexique et la Californie, connaissent des périodes de sécheresses prononcées. Ce phénomène climatique augmente le nombre de cyclones dans l'Atlantique tandis qu'il diminue le cisaillement vertical des vents. Dans le Pacifique les forces et la trajectoire des tempêtes sont différentes, mais comme le jet-stream change de latitude, elles sont moins fréquentes.



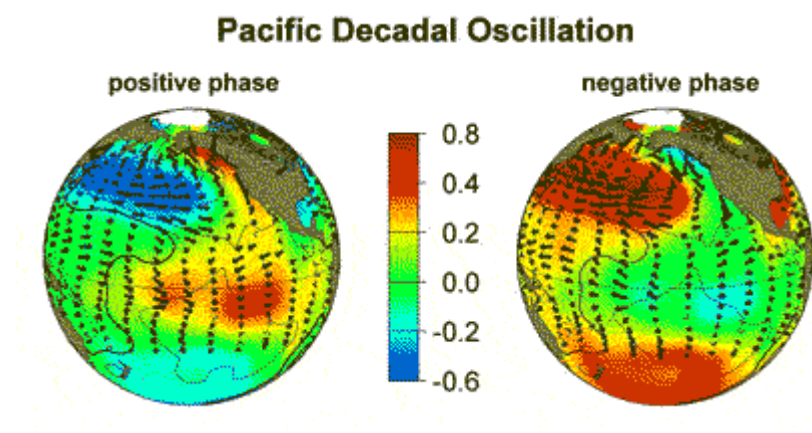


**Figure V.1-10:** Sir Gilbert Walker fournit un élément important pour la compréhension d'El Niño quand il découvrit que les pressions au niveau de la mer dans le Pacifique sud oscillaient entre deux états distincts. Pendant une phase d'indice haut de ce que Walker a dénommé "Oscillation Australe" (en haut, pour novembre 1988), la pression est plus élevée (rouge sombre) près et à l'est de Tahiti qu'à l'ouest dans la région de Darwin. Ce gradient de pression le long de l'équateur entraîne l'air vers l'ouest (flèche longue). Quand l'atmosphère bascule dans une phase d'indice bas (en bas, pour novembre 1982), les baromètres sont à la hausse dans l'ouest et à la baisse dans l'est, signalant une réduction, voire une inversion, de la différence de pression entre Darwin et Tahiti. L'aplatissement de cette structure de pression provoque l'affaiblissement des alizés de surface, et leur retrait vers l'est. On sait que cette phase d'indice bas est habituellement accompagnée de conditions El Niño.



***L'Oscillation Décennale du Pacifique*** (*Pacific Decadal Oscillation - PDO*) : en 1996, le Scientifique Steven Hare a montré qu'une deuxième oscillation existait dans le Pacifique avec l'ENSO : c'est l'Oscillation Décennale du Pacifique (PDO) (figure V.1-11). Elle interfère avec la « confrérie » ENSO, impactant le Pacifique dans sa totalité, mais se fait sentir plus singulièrement dans sa partie nord. Elle se caractérise par une variation de l'anomalie de la température de la surface du Pacifique pendant 20 à 30 ans, contrairement à l'ENSO qui persiste pendant 6 à 18 mois environ. La PDO est un phénomène comparable à l'ENSO mais avec une amplitude bien plus grande, et qui est caractérisée par une répartition des anomalies de la température de l'océan en « fer à cheval », alors que l'ENSO est une répercussion tout le long du Pacifique entre les tropiques. Les causes du PDO ne sont actuellement pas bien connues parce que cette oscillation est longue. Il est aussi difficile de le prévoir, contrairement à *El-Niño* et *La-Niña*. L'identification du PDO est importante par ailleurs, parce qu'elle montre que les conditions climatiques peuvent changer sur de longues périodes dans le Pacifique.

Les phases du PDO peuvent s'associer avec *El-Niño* ou *La-Niña*. La phase positive du PDO qui a des températures de la surface de la mer élevées dans le Pacifique équatorial, peut rehausser un épisode d'El Niño, en amplifiant les conséquences de ce dernier. Cette même phase du PDO affaiblirait l'épisode de La Niña qui se produirait pendant cette période. De la même façon, pendant une phase négative du PDO, les événements La Niña seraient plutôt rehaussés, et les événements El Niño seraient affaiblis.



**Figure V.1-11 :** Les températures de surface de l'Océan Pacifique boréal, qui caractérisent les phases positives (chaudes) et les phases négatives (froides) de l'oscillation décennale du Pacifique.

### V.1.5 Apport fluvial à l'Océan

Les cours d'eau du bassin versant pacifique péruvien prennent leur source à de hautes altitudes dans la Cordillère, environ 5 000 à 6 000 mètres. Le parcours entre la source et l'océan est en général assez court, de 100 à 200 km en moyenne de distance. Ces cours d'eau ont de petits bassins versants, accidentés, avec de fortes inclinaisons et des régimes torrentiels, et des débits notoires. L'été austral (de décembre à mars), quand les pluies et le dégel sont les plus importants, est une période de fortes crues (figure V.1-12). Ces fleuves présentent un gradient nord-sud de volume d'eau transporté : plus important au nord, il tend à diminuer en allant vers le sud. Pendant les mois d'étiage par ailleurs ces rivières arrivent presque à un complet assèchement.

Les principaux fleuves du Pérou<sup>13</sup>, du nord au sud, sont les fleuves Tumbes, Chira, Chancay-Lambayeque, Jequetepeque, Santa, Pativilca, Huaura, Rimac, Cañete, Ocoña Majes et Tambo. Parmi ces derniers, les fleuves Huaura, Rimac, Cañete sont les plus proches de Callao (zoom sur la carte hydrographique du Pérou, figure V.1-12). Leurs débits et volumes de transport d'eau sont présentés dans le tableau V.1-3 et dans la figure V.1-13.

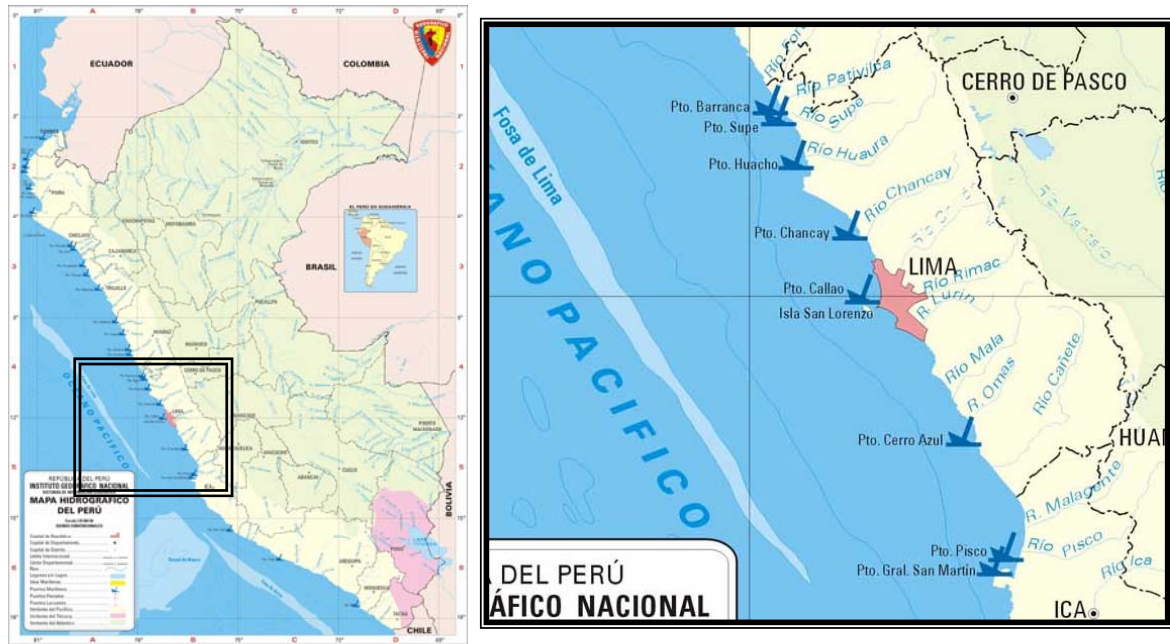
**Tableau V.1-3 :** Débits et volumes de transport d'eau moyens annuels des principaux fleuves de la région de Lima

Fleuve	Débit moyen annuel (m <sup>3</sup> *s <sup>-1</sup> )	Écoulement total annuel (MMC)*
Huaura	34,5	1088,0
Rimac	26,3	829,4
Cañete	58,3	1838,5

\*MMC : millions de mètres cubes

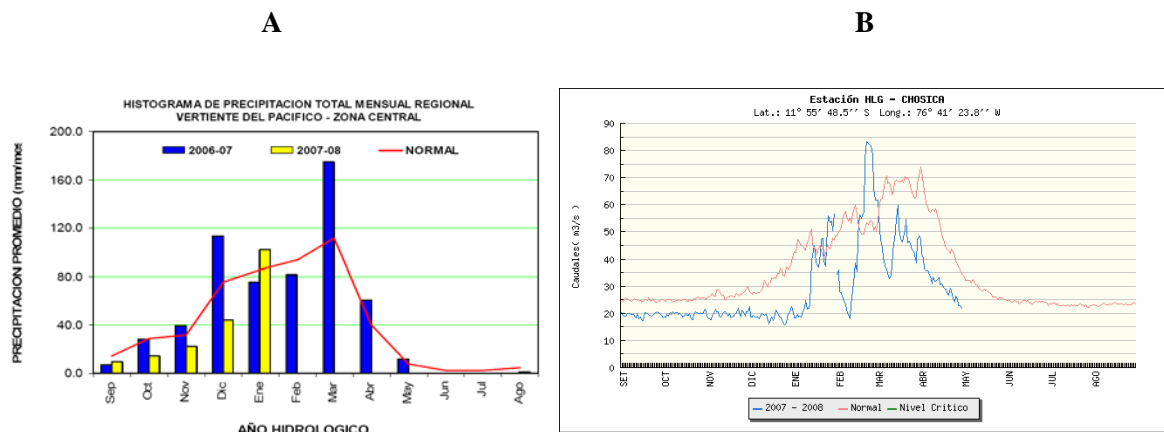
**Source:** [http://www.portalagrario.gob.pe/hidro\\_hidro\\_inf.shtml](http://www.portalagrario.gob.pe/hidro_hidro_inf.shtml)

<sup>13</sup> D'après : [http://www.portalagrario.gob.pe/-hidro\\_hidro\\_inf.shtml](http://www.portalagrario.gob.pe/-hidro_hidro_inf.shtml), consulté le 15 mai 2008



**Figure V.1-12:** Carte du réseau hydrographique Péruvien, détail sur la côte centrale autour de Callao.

Source: <http://www.informacionisulperu.info/peru-mapas/peru-hidrografico.jpg>



**Figure V.1-13 :** A - Précipitations annuelles dans la partie centrale du versant Pacifique ; B - Débit annuel dans une station du fleuve Rimac, en amont de Lima.

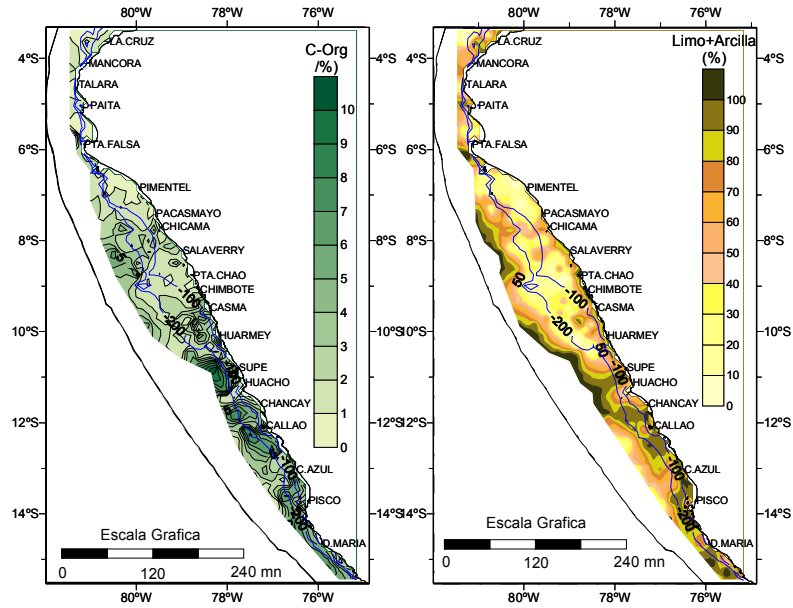
Source : A - Boletín hidrometeorológico del Perú (Año VIII – N°01 – Febrero 2008)

B - <http://www.senamhi.gob.pe/main.php?u=inter&p=0309>

### V.1.6 Sédimentologie

Les sédiments superficiels de cette zone intègrent les caractéristiques physico-chimiques d'un des plus éminents courants océaniques de bord est du monde : le courant du Pérou. L'association entre le régime des vents, la circulation océanique et la productivité primaire conduisent au dépôt de sédiments riches en matière organique, silice biogène et phosphorites. La zone d'*upwelling* se situe à l'heure actuelle sur la partie supérieure du talus continental, entre 150 et 500 mètres de profondeur, et son enregistrement se fait sous forme de deux faciès sédimentaires différents. Un premier faciès, riche en carbone organique et pauvre en carbonates, s'accumule au niveau du plateau continental au droit de Lima . Les sédiments fins qui le caractérisent sont très riches en matière organique et tendent à augmenter vers le nord. Selon l'étude de la sédimentation superficielle, plusieurs zones d'*upwelling* montrent de fortes concentrations en carbone organique (Delgado & Gomero, 1988 et 1995; Velazco, 1999; Velazco & Solís, 2000). Ces zones sont aussi caractérisées par de fortes concentrations de diatomées (en moyenne plus de 20%) ce qui indique une forte production primaire (Delgado *et al.* 1987) (figure IV.1-14). Le deuxième faciès est plutôt caractérisé par une richesse en calcaire et phosphorite, qui s'accumule dans les bassins de Yaquina et Trujillo (Suess *et al.*, 1990).

La combinaison entre de fortes productivités près des zones caractérisées par des conditions anoxiques et de faibles apports terrigènes, fait que les sédiments organiques dans ces zones d'*upwelling* sont très bien préservés et sont donc de bons marqueurs des conditions physico-chimiques de ces zones. La campagne ODP Leg 112 (Suess *op. cit.*) a montré que depuis le Miocène supérieur et jusqu'à l'Holocène (en certains points), les conditions de remontée d'eaux profondes sur la marge péruvienne ont été récurrentes, et que des séquences laminées étaient fréquentes dans de nombreux bassins, notamment ceux qui sont en position interne par rapport à la ZMO.

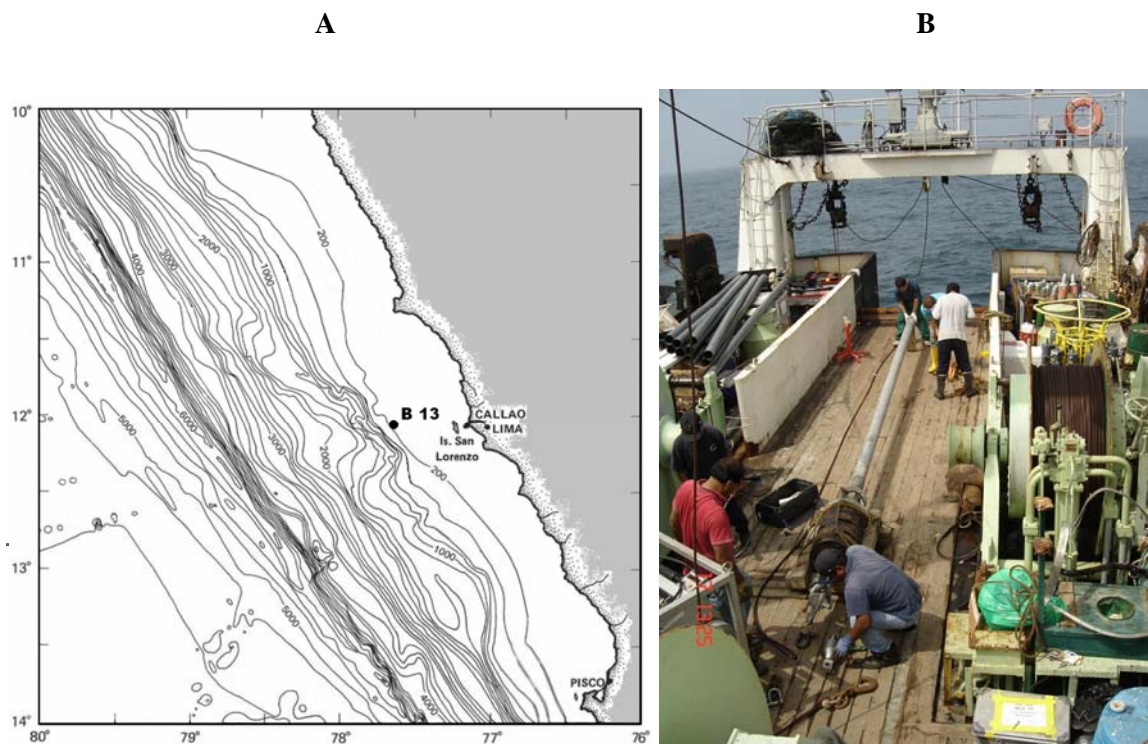


**Figure IV.1-14 :** Distribution spatiale des teneurs en carbone organique (à gauche) ; et, Distribution spatiale des fractions granulométriques fines (silt + argiles) (à droite) des sédiments superficiels de la plateforme continentale centro-nord du Pérou.

## V.2. Résultats

### V.2.1. Prélèvement

La carotte B13 a été prélevée à environ 31 miles marins au SE de la pointe de Callao ( $12^{\circ} 0,783' S$  ;  $77^{\circ} 42,627' W$ ) sous une tranche d'eau de 185 m, à l'aide d'un carottier à piston de type « *long gravity core* » de 6 mètres de long et 14 cm de diamètre interne (figure V.2-1). L'opération a eu lieu le 17/04/2005, durant le « *Crucero de investigaciones biogeoquímicas MPI/IMARPE*<sup>14</sup> (14–22 avril 2005) » sur le navire océanographique BIC\* José Olaya Balandra. (\* « *Buque de investigación científica* »)



**Figure V.2-1 : A -** Position de la carotte B13 par rapport à la distribution bathymétrique de la plateforme continentale centrale du Pérou.

**B –** Le carottier utilisé à bord du BIC José Olaya Balandra.

Obs. : Modifié de Von Huene *et al.* (1986).

<sup>14</sup> MPI/IMARPE = Max Plank Institute / Instituto del Mar del Peru

A bord, la carotte a été coupée en sections de ~1 mètre de longueur, conditionnées dans la chambre froide du navire. Une fois à terre, les tubes ont été stockés dans les dépendances de l'IMARPE (Callao), pour ensuite être envoyés au Centre de l'IRD d'Île de France, à Bondy, où ils ont été stockés en chambre froide. En 2005, l'ouverture des carottes a eu lieu au laboratoire de sédimentologie de l'UMR EPOC<sup>15</sup> (5805 CNRS) de l'Université de Bordeaux, où elles ont été radiographiées.

Après ouverture, une « demie »-carotte a été archivée à Bondy et l'autre moitié a été sous-échantillonnée en tranches de 1 centimètre d'épaisseur. Les sédiments ainsi obtenus ont été séchés en étuve à 40-50°C, broyés ensuite en mortier d'agate et conditionnés en sachets plastiques.

### V.2.2. Caractéristiques lithologiques

#### V.2.2.1. Analyses SCOPIX

Cette section décrit les caractéristiques lithologiques déduites de l'observation visuelle à l'aide d'images radioscopiques à haute résolution, du traitement digital de ces dernières (en niveaux de gris), et des analyses de densité. Le profil en niveaux de gris et la densité de la carotte sont présentés dans les figures V.2-2 et V.2-3.

Les images radioscopiques montrent des sédiments à lamines et à bandes irrégulières à la base, évoluant vers des niveaux de plus en plus laminés au sommet. À 381 cm de profondeur, on note la présence d'un niveau de 3 centimètres d'épaisseur, rougeâtre et dense aux rayons X. Des figures sédimentaires caractérisant des glissements de couches « *slump* » ont été mises en évidence entre 295 et 310 cm. À 240 cm, une surface érosive de contact est très visible, montrant une discordance sédimentaire due à l'érosion ou à un arrêt de sédimentation. De 206 à 176 cm, les sédiments présentent une alternance entre bandes claires et sombres. La présence

---

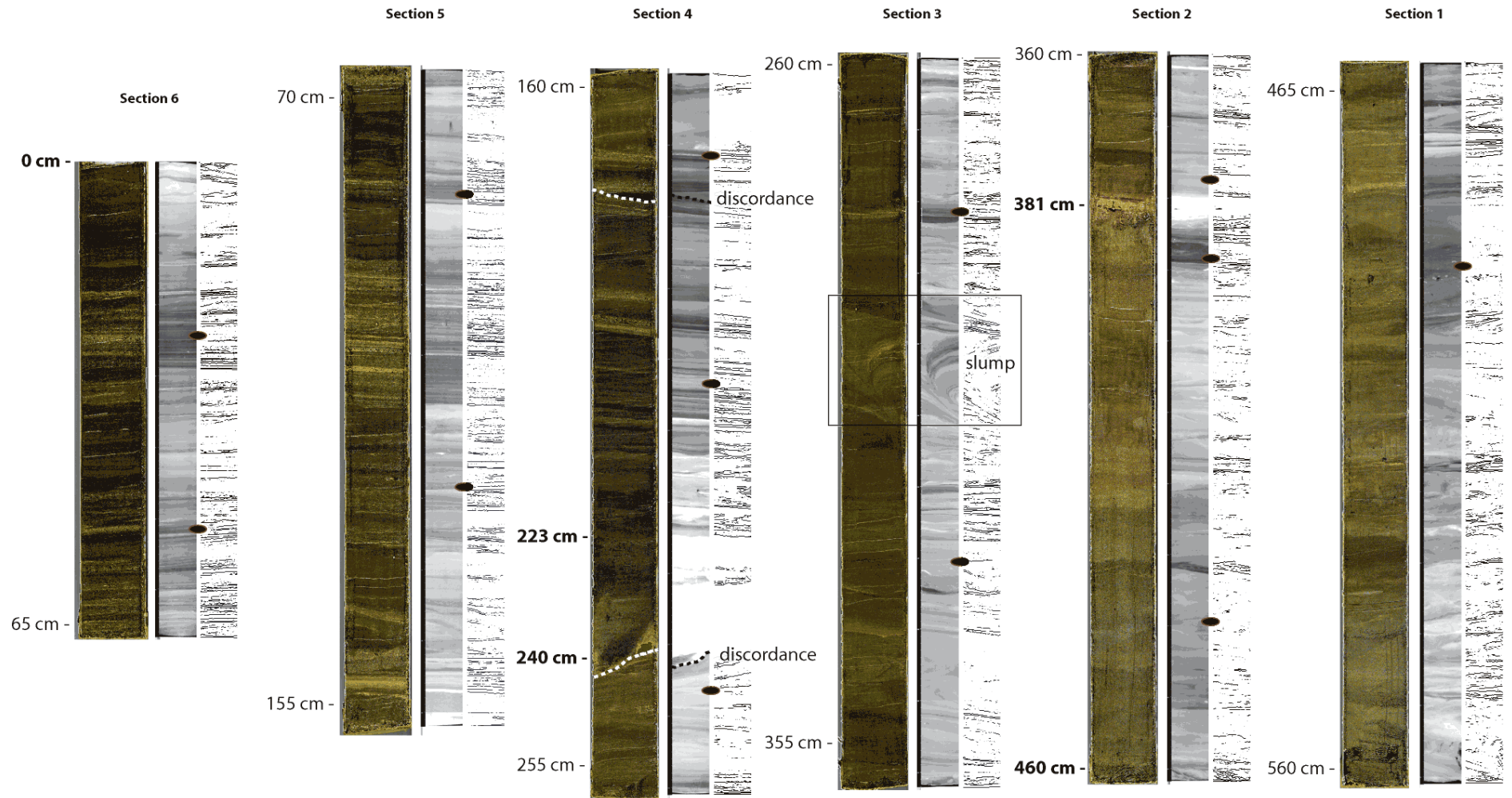
<sup>15</sup> Environnements et Paléoenvironnements OCéaniques (UMR 5805 CNRS/Université de Bordeaux 1)

d'alternance entre lamines claires et sombres est visible à partir de 176 cm et jusqu'au sommet de la carotte.

Les variations des niveaux de gris le long de la carotte confirment l'observation lithologique, avec des valeurs élevées et stables à la base qui diminuent vers le sommet de la carotte. La densité apparente mesurée sur la carotte, avec une résolution de 1 cm, est parfaitement compatible avec les valeurs de niveaux de gris (0,012 cm de résolution). Leur variation permet de mettre en évidence cinq unités distinctes :

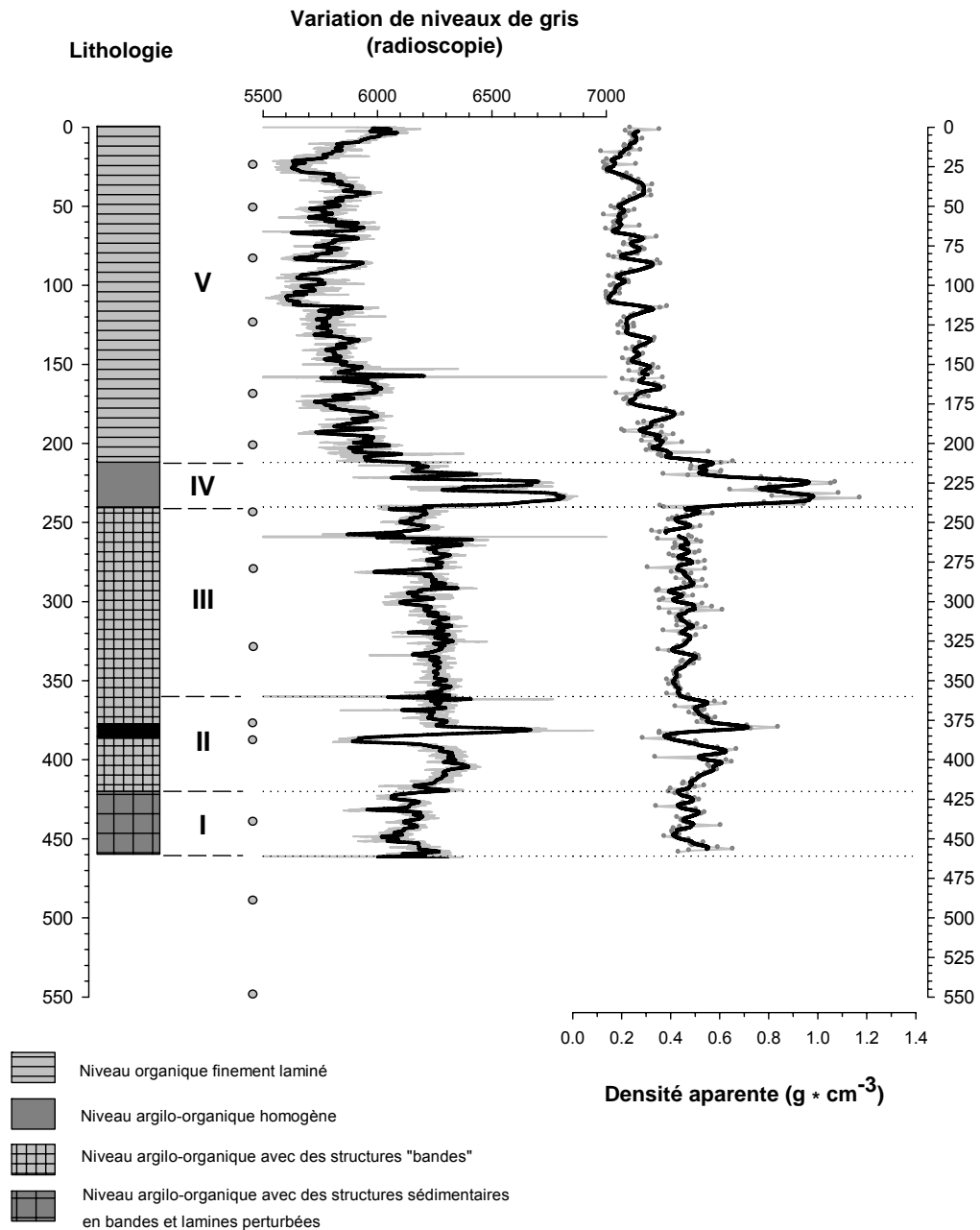
- **Unité I** - (460 - 420 cm) : cette unité basale présente des valeurs de densité et de niveaux de gris stables variant respectivement autour de  $0,47 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  et de 6150 ;
- **Unité II** - (420 - 361 cm) : dans cette unité, on note une augmentation progressive et parallèle des valeurs de densité (0,5 à  $0,7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) et de niveaux de gris (6 200 à 6 400). Dans la partie supérieure de cette unité, les valeurs très élevées caractérisent le niveau rougeâtre (très dense, riche en fraction minérale) ;
- **Unité III** - (361 - 240 cm) : cette unité est caractérisée par une stabilité des valeurs de densité ( $0,45 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) et des niveaux de gris (6 250) ;
- **Unité IV** - (240 - 212 cm) : juste après la surface érosive marquant la limite avec l'unité sous-jacente, on note une augmentation des valeurs de la densité et des niveaux de gris variant autour de  $1,17 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  et de 6 800, qui diminuent graduellement vers le sommet ( $0,36 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) et 6 150;
- **Unité V** - (212 - 0 cm) : dans cette unité, la densité affiche des valeurs moyennes autour de  $0,26 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , et présente une légère tendance à la diminution de la base vers le sommet. La variabilité, aussi bien de





**Figure V.2-2 :** Images SCOPIX, photos et images SCOPIX traitées des sections de la carotte B13.

la densité que des valeurs de gris, y est plus marquée qu'à la base de la carotte. Ceci est dû à la présence de laminations. La courbe de variation des niveaux de gris affiche la même tendance que celle de la densité, avec une moyenne autour de 5 800.



**Figure V.2-3 :** Lithologie, niveaux de gris (SCOPIX) et densité apparente de la carotte B13.

**Tableau V.2-1** : Caractéristiques de la densité apparente des sédiments de la carotte B13 selon ses unités lithologiques

	<i>Moyenne</i>	<i>Maximum</i>	<i>Minimum</i>	<i>Écart-type</i>
<b>Unité I</b>	0,47	0,65	0,34	0,06
<b>Unité II</b>	0,53	0,84	0,29	0,10
<b>Unité III</b>	0,45	0,61	0,31	0,06
<b>Unité IV</b>	0,77	1,17	0,37	0,21
<b>Unité V</b>	0,26	0,66	0,12	0,08

### V.2.2.2. Chronologie et taux de sédimentation

Au total 14 âges radiocarbone ont été déterminés sur de la matière organique sédimentaire totale. Ces âges sont en accord avec ceux publiés dans la région (Rein *et al.*, 2004, 2005 et 2007 ; Skilbeck & Fink, 2006).

Les âges  $^{14}\text{C}$  BP ont été calibrés en tenant compte de la correction de l'effet réservoir régional proposé par les données de l'effet réservoir marin (<http://calib.qub.ac.uk/marine>) de  $\Delta R = 243 \pm 49$  (Tableau V.2-2, figure V.2-4). Cette correction est en accord avec celle calculée par Dimitri GUTIÉRREZ<sup>16</sup> (communication personnelle) pour la région centrale du Pérou de  $\Delta R = 251 \pm 50$ . et par Vargas (2002) pour la côte nord du Chili (23°S) de  $\Delta R = 263 \pm 13$ .

La distribution des âges  $^{14}\text{C}$  dans la partie inférieure de la carotte (Unités I, II et III) met en évidence deux courbes de variation des taux de sédimentation. Une de 13 970 à 11 940 ans cal BP, et l'autre de 12 360 à 10 600 ans cal BP. La deuxième témoigne d'un vieillissement des âges dans les deux unités supérieures de cette partie de la carotte, plus important à la base qu'au sommet. En effet, ce vieillissement est probablement une conséquence de la variation eustatique du niveau marin. Le niveau minimum le plus récent a été atteint durant le dernier maximum glaciaire (20 000 ~

<sup>16</sup> Direction of Oceanographic Research / Instituto del Mar del Perú  
Esquina Gamarra y General Valle s/n, Chucuito - Callao  
Email: dgutierrez@imarpe.gob.pe

18 000 ans BP), de l'ordre de 100 à 120 m plus bas que l'actuel à Tahiti et à Barbados par exemple (Fairbanks, 1990 et 1992 ; Bard *et al.*, 1996 ; Peltier & Fairbanks, 2006 ; Deschamps 2008). Ce qui fait que lors de la mise en place de l'unité I, contemporaine du tardi-glaciaire, la cellule de productivité de l'*upwelling* était déplacée plus vers le large. De ce fait, l'influence de l'*upwelling* était moins intense, voire presque nulle sur la zone où a été prélevée la carotte, et par conséquent les âges de cette unité sont moins affectés par l'effet réservoir. La remontée amorcée durant le post-glaciaire a dû, à partir de la mise en place de la seconde unité, favoriser l'installation de conditions favorables à l'*upwelling* au niveau de la zone étudiée, ce qui expliquerait le vieillissement des âges affectés par un effet réservoir plus significatif. On peut alors supposer que l'extrapolation des taux de sédimentation à partir de la première courbe (trois premières datations : 439-440, 489-490, et 540-550 cm) est la plus adéquate, et que l'inclinaison entre cette droite et la deuxième courbe correspond aux valeurs des vecteurs de l'effet réservoir qui a pu affecter les âges de ces unités. La diminution des valeurs en allant vers le sommet de cette unité peut être expliquée par la diminution, même avec une augmentation progressive du niveau de la mer, de l'intensité des vents favorables à l'*upwelling* résultant des changements des paramètres orbitaux (l'insolation) (Rein et al., 2005).

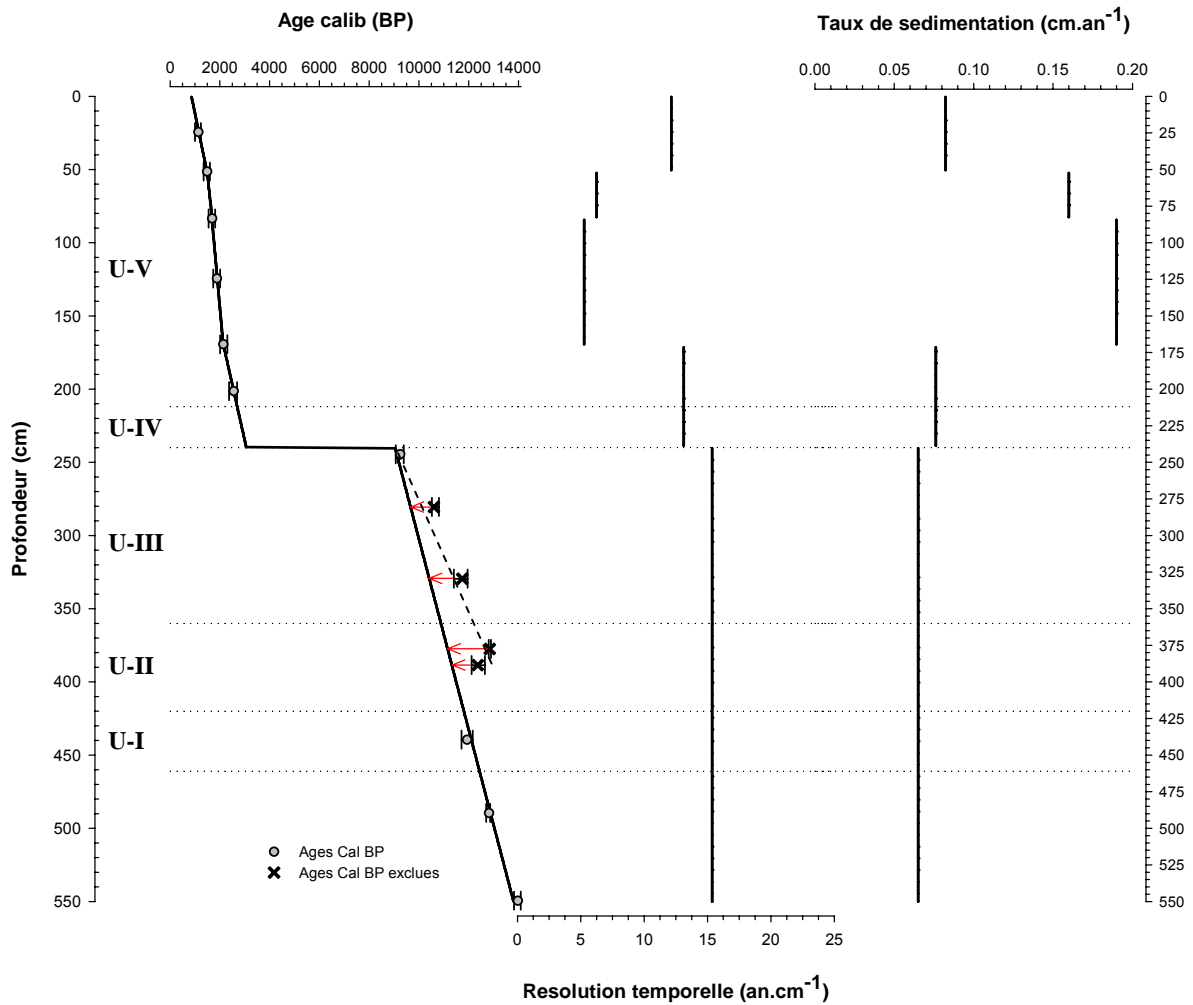
La distribution des âges en fonction de la profondeur montre que la carotte a enregistré 13 000 ans d'histoire paléoclimatique et a mis en évidence l'existence d'un arrêt de sédimentation (hiatus) entre 9 040 ans cal BP (201-202 cm) et 3 060 ans cal BP (244-245 cm). De part et d'autre du hiatus, les âges sont en parfaite cohérence et montrent des taux de sédimentation variant entre 0,065 et 0,190 cm\*an<sup>-1</sup> dans la partie supérieure (3 060 à 0 ans cal BP) et de 0,065 cm\*an<sup>-1</sup> de 13 000 à 9 040 ans cal BP. La résolution temporelle des échantillons varie donc entre 5 et 15 ans par centimètre (figure V.2-4 et tableau V.2-3).

**Tableau V.2-2** : Résultats des datations radiocarbone réalisées au LMC14 ;

Référence de l'échantillon	Numéro de la cible	Nature	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	Âge $^{14}\text{C}$ BP	Âge $^{14}\text{C}$ cal BP		
					Prob.Max.**	-2 $\sigma$	+2 $\sigma$
B13-COR.3 SEC.6 24 - 25 cm	SacA 6797	MOT*	-21,90	<b>1810</b> $\pm$ 30	<b>1140</b>	140	100
B13-COR.3 SEC.6 51 - 52 cm	SacA 7643	MOT	-17,70	<b>2170</b> $\pm$ 30	<b>1490</b>	140	110
B13-COR.3 SEC.6 83 - 84 cm	SacA 6798	MOT	-21,80	<b>2345</b> $\pm$ 30	<b>1690</b>	140	120
B13-COR.3 SEC.6 124 - 125 cm	SacA 7644	MOT	-21,50	<b>2515</b> $\pm$ 30	<b>1880</b>	140	130
B13-COR.3 SEC.6 169 - 170 cm	SacA 6799	MOT	-18,60	<b>2735</b> $\pm$ 30	<b>2140</b>	130	160
B13-COR.3 SEC.6 201 - 202 cm	SacA 7645	MOT	-21,40	<b>3045</b> $\pm$ 30	<b>2560</b>	190	130
B13-COR.3 SEC.6 244 - 245 cm	SacA 7646	MOT	-20,10	<b>8820</b> $\pm$ 40	<b>9250</b>	180	140
B13-COR.3 SEC.6 280 - 281 cm	SacA 6800	MOT	-20,10	<b>10 020</b> $\pm$ 40	<b>10 600</b>	80	200
B13-COR.3 SEC.6 329 - 330 cm	SacA 7647	MOT	-22,30	<b>10 785</b> $\square$ 45	<b>11 740</b>	340	220
B13-COR.3 SEC.6 377 - 378 cm	SacA 7648	MOT	-21,60	<b>11 500</b> $\square$ 50	<b>12 850</b>	50	50
B13-COR.3 SEC.6 388 - 389 CM	SacA 7649	MOT	-18,70	<b>11 100</b> $\square$ 70	<b>12 360</b>	240	290
B13-COR.3 SEC.6 439 - 440 cm	SacA 7650	MOT	-22,80	<b>10 870</b> $\square$ 50	<b>11 940</b>	230	220
B13-COR.3 SEC.6 489 - 490 cm	SacA 6801	MOT	-22,30	<b>11 410</b> $\square$ 60	<b>12 820</b>	120	40
B13-COR.3 SEC.6 540 - 550 cm	SacA 7651	MOT	-22,90	<b>12 760</b> $\square$ 60	<b>13 970</b>	240	120

\*MOT – matière organique totale

\*\*Prob.Max – âge le plus probable



**Figure V.2-4 :** Chronologie, taux de sédimentation et résolution temporelle de l'échantillonnage de la carotte B13.

**Tableau IV.2-3 :** Descriptif statistique des taux de sédimentation et de la résolution temporelle en fonction des unités lithologiques de la carotte B13.

	Taux de sédimentation (cm*an <sup>-1</sup> )				Résolution temporelle (an*cm <sup>-1</sup> )			
	(0,082)	(0,160)	(0,190)	(0,076)	(12)	(6)	(5)	(13)
Unité V								
Unité IV								
Unité III								
Unité II								
Unité I								

### V.2.3. Analyses élémentaires

Les principales variations, par unités lithologiques, du carbone total (CT) et du carbone organique total (COT), obtenus respectivement par l'analyse élémentaire et par pyrolyse Rock-Eval 6, ainsi que du rapport C:N<sub>atomique</sub> (C<sub>organique</sub>:N<sub>total</sub>), sont présentés ci-dessous et figure V.2-5.

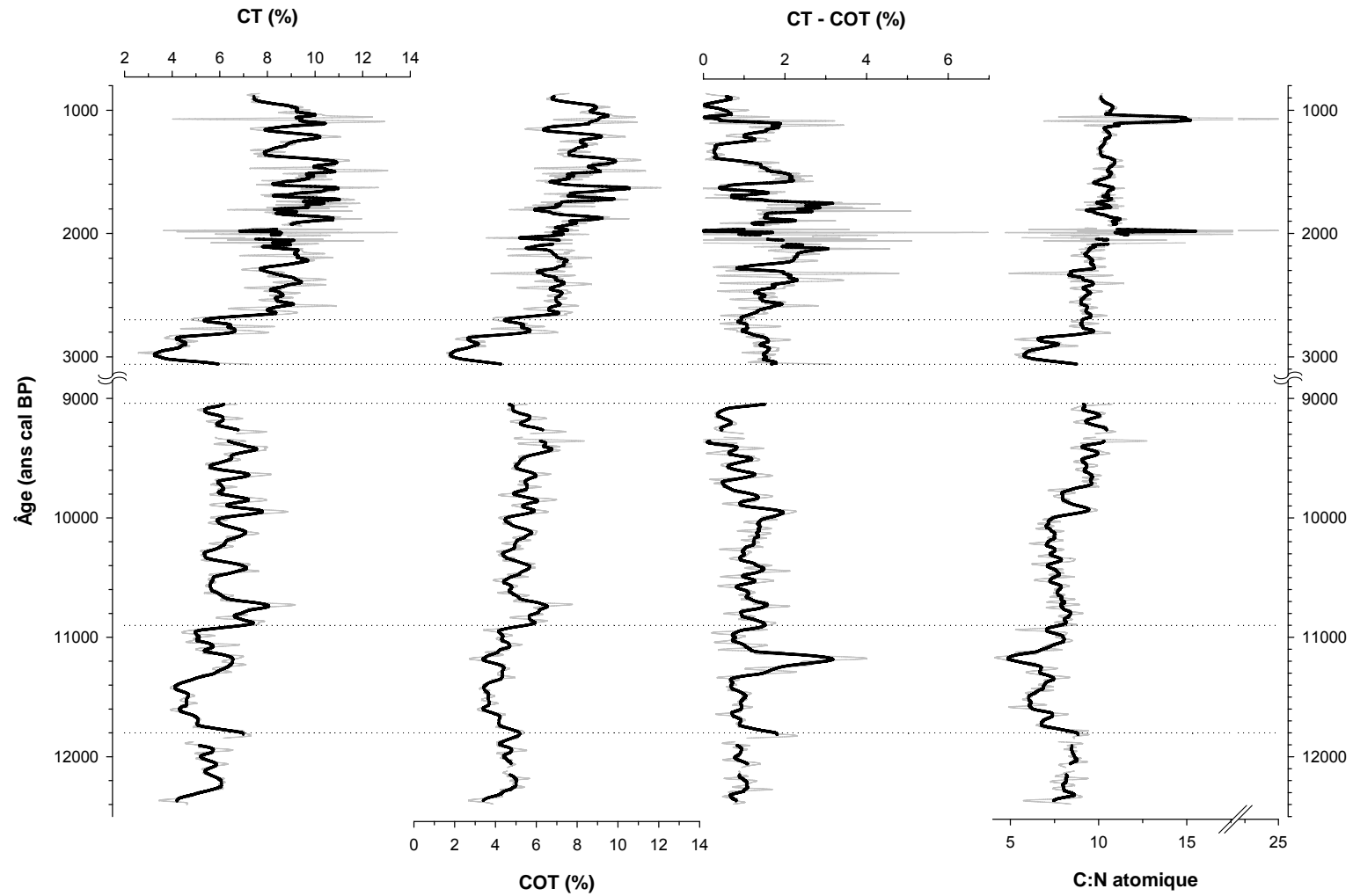
- **Unité I** (460 - 420 cm, 12 400 – 11 900 ans cal BP) – Le CT, le COT et le C:N présentent des valeurs stables variant respectivement autour de 5,4 %, 4,3% et 7,8 ;
- **Unité II** (420 - 361 cm, 11 900 – 10 100 ans cal BP) – Cette unité est caractérisée par une diminution parallèle des trois paramètres CT, COT et C:N, avec des valeurs autour de 5% pour le CT, 4% pour le COT et 7% pour le C:N avec une légère tendance négative ;
- **Unité III** : (361 - 240 cm, 10 900 – 9 040 ans cal BP) – Elle est caractérisée par une variabilité plus prononcée des valeurs du CT et du COT, variant respectivement autour de 7% et 5%. Le C:N quant à lui affiche une faible variabilité, autour de 8 jusqu'à 10 000 ans cal BP, puis amorce une légère augmentation (10) jusqu'au sommet de cette unité (9 040 ans BP) ;
- **Unité IV** (240 - 212 cm, 3 060 – 2 700 ans cal BP) – Les profils de CT, COT et C:N, sont caractérisés par un accroissement progressif des valeurs de la base vers le sommet, respectivement de 2,6 à 8,2 %, de 1,6 à 6,9 % et de 5,3 à 10,5 ;

- **Unité V** (212 - 0 cm, 2 700 – 860 ans cal BP) – Dans cette unité, toutes les courbes montrent une variabilité de plus haute fréquence et amplitude que les précédentes. Les valeurs de CT et de COT sont beaucoup plus fortes, de l'ordre de 9% et 7,5 %. Le C:N dans la moitié inférieure varie autour de 9, il est légèrement plus élevé dans la moitié supérieure (~ 11).

**Tableau V.2-4** - Descriptif statistique des résultats des analyses élémentaires, en fonction des unités lithologiques, de la carotte B13.

		Moyenne	Maximum	Minimum	Écart-Type
Unité V	CT	9,03	13,24	3,63	1,56
	COT	7,54	12,00	3,70	1,41
	C:N	10,32	29,08	4,94	2,20
Unité IV	CT	4,91	8,21	2,58	1,49
	COT	3,52	6,89	1,63	1,57
	C:N	7,62	10,55	5,28	1,57
Unité III	CT	6,42	8,98	5,06	0,86
	COT	5,41	8,35	3,89	0,80
	C:N	8,49	12,74	6,08	1,19
Unité II	CT	5,27	7,10	3,96	0,88
	COT	4,07	5,46	2,77	0,59
	C:N	6,82	9,42	4,13	1,03
Unité I	CT	5,49	7,26	3,46	0,78
	COT	4,52	5,67	2,68	0,59
	C:N	8,29	9,45	5,75	0,71





**Figure V.2-5 :** Teneurs élémentaires de carbone total, carbone organique total, ratio C:N et carbone inorganique, des sédiments de la carotte B13

### V.2.4. Pyrolyse Rock-Eval

Les variations du COT, de l'IH (indice d'hydrogène) et de l'IO (indice d'oxygène) sont présentées dans la figure V.2-6. Seules celles de l'IH et de l'IO seront décrites ci-dessous, le COT ayant déjà été décrit dans la section antérieure (analyse élémentaire). La variation de ces deux indices le long de la carotte B13 confirme les coupures lithologiques :

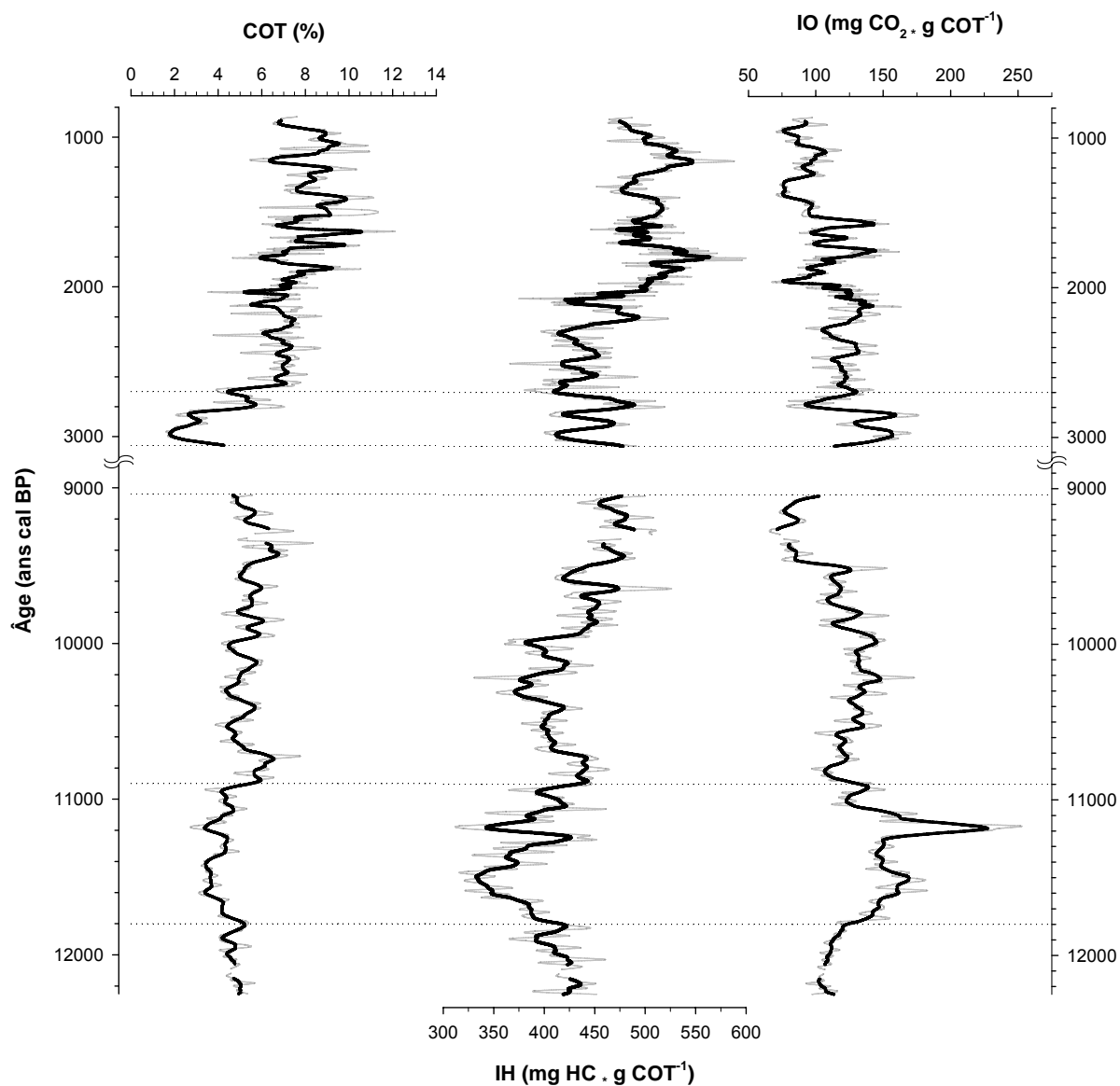
- **Unité I** (460 - 420 cm, 12 420 – 11 800 ans cal BP) – elle est caractérisée par une légère diminution des valeurs de l'indice d'hydrogène, de 450 à 400 mgHC\*gCOT<sup>-1</sup>, accompagnée d'une augmentation progressive de celles de l'IO, de 90 à 125 mgO<sub>2</sub>\*gCOT<sup>-1</sup>;
- **Unité II** (420 - 361 cm, 11 800 – 10 900 ans cal BP) – Dans cette unité, à part des pics isolés, on note une augmentation des valeurs de l'IO et inversement une diminution de celles de l'IH. À partir de 11 200 ans cal BP, la tendance s'inverse ;
- **Unité III** (361 - 240 cm, 10 900 – 9 040 ans cal BP) – Dans cette unité, les valeurs de ces deux indices évoluent inversement, comme dans la précédente unité, avec une diminution des valeurs de l'IH associée à une augmentation de celles de l'IO. L'inversion de cette tendance est marquée à partir de 10 000 ans BP jusqu'au sommet de cette unité. En plus de ces tendances on note une variabilité marquée de ces deux indices tout au long de cette unité ;
- **Unité IV** (240 - 212 cm, 3 060 – 2 700 ans cal BP) – Dans cette unité, l'IH et l'IO évoluent en opposition de phase et dessinent des courbes caractérisées par une forte variabilité autour d'une valeur moyenne de 450 pour l'IH et 140 pour l'IO ;

- **Unité V** (212 - 0 cm, 2 700 – 860 ans cal BP) – Cette unité peut-être subdivisée en deux sous-unités. La première, de 2 700 à 2 000 ans BP (sous-unité a), est caractérisée par une faible variabilité des deux indices autour de 175 mgO<sub>2</sub>\*gCOT<sup>-1</sup> pour l'IO et 450 mgHC\*gCOT<sup>-1</sup> pour l'IH. La seconde, de 2 000 à 860 ans BP (sous-unité b), est globalement marquée par une variabilité plus ample avec des cycles bien définis. Les valeurs de l'IH sont les plus fortes de toute la série (600 mgHC\*gCOT<sup>-1</sup>), et l'IO atteint ses plus faibles valeurs (70 mgO<sub>2</sub>\*gCOT<sup>-1</sup>).

Globalement la matière organique contenue dans les sédiments de la carotte B13 est plus oxydée ou oxygénée dans la partie basale, comme le montre la réduction de l'indice d'oxygène combinée avec l'augmentation de la teneur en carbone organique (figure V.2-7 A). Cette matière organique est totalement de type II, c'est-à-dire dérivée de la matière algaire marine, comme le montrent les diagrammes de dispersion de l'IO *versus* IH (pseudo Van Krevelen) et S2 *versus* COT (figure V.2-7 B et C).

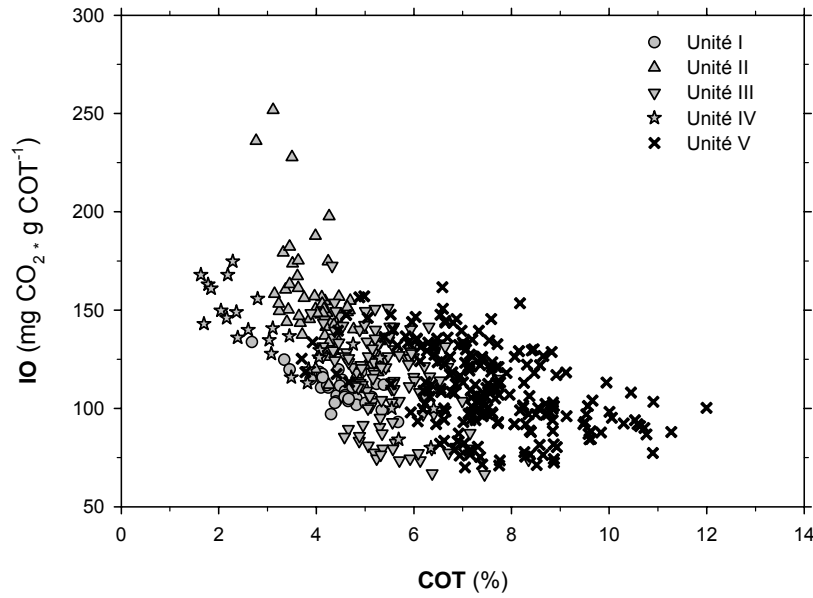
**Tableau V.2-5 :** Descriptif statistique des résultats des pyrolyses Rock-Eval, en fonction des unités lithologiques, de la carotte B13.

		Moyenne	Maximum	Minimum	Écart-type
<b>Unité V</b>	COT	7,54	12,00	3,70	1,41
	IH	489	603	366	41
	IO	110	162	70	21
<b>Unité IV</b>	COT	3,52	6,89	1,63	1,57
	IH	448	519	401	34
	IO	132	175	80	26
<b>Unité III</b>	COT	5,41	8,35	3,89	0,80
	IH	432	522	331	37
	IO	115	173	67	23
<b>Unité II</b>	COT	4,07	5,46	2,77	0,59
	IH	379	461	316	36
	IO	153	252	112	26
<b>Unité I</b>	COT	4,52	5,67	2,68	0,59
	IH	414	466	369	23
	IO	112	143	93	10

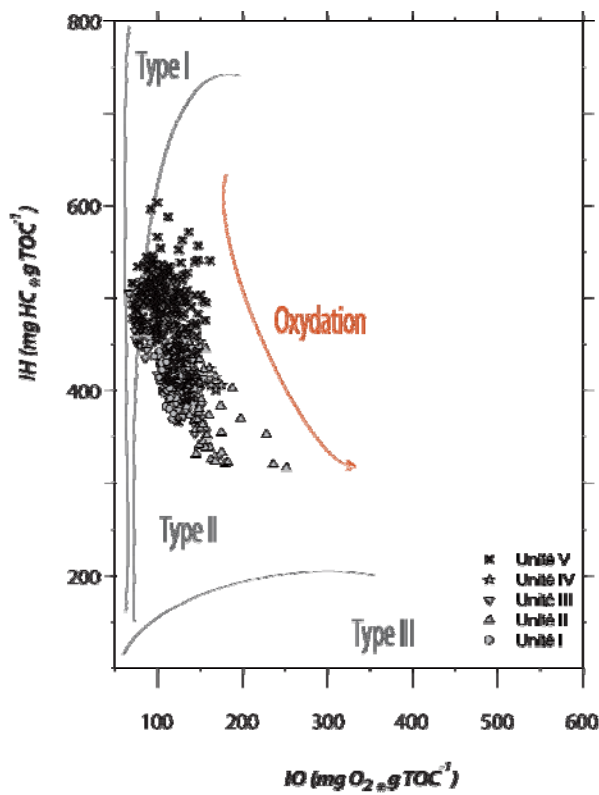


**Figure V.2-6** : Teneur en carbone organique total, indice d'hydrogène et indice d'oxygène dérivés de la pyrolyse Rock-Eval 6, des sédiments de la carotte B13.

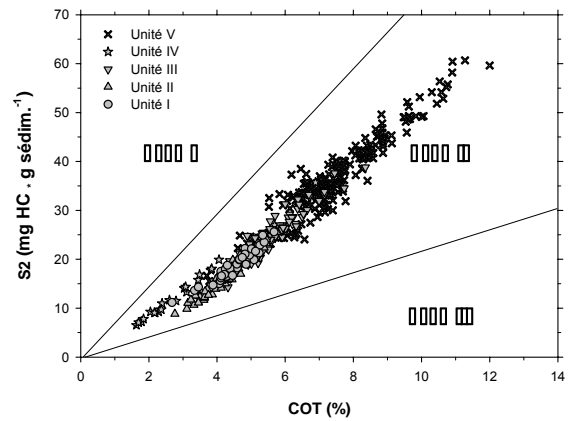
A



B



C



**Figure V.2-7** : Diagrammes de dispersion : **A** – des variables IO *versus* COT ; **B** – IH *versus* IO ; et **C** – S2 *versus* COT, dérivés de la pyrolyse Rock-Eval 6, des sédiments de la carotte B13.

### V.2.5. Pétrographie de la matière organique sédimentaire

L'observation pétrographique (Palynofaciès) d'un total de 88 échantillons a permis l'identification de 19 fractions organiques, classées par ordre croissant de leurs proportions relatives, et regroupées en deux familles majeures suivant leur origine supposée terrestre ou marine (Tableau V.2-6). Nous avons décidé de décrire principalement les fractions dont les pourcentages sont les plus significatifs, à savoir : la matière organique amorphe (MOA) gélifiée, la MOA floconneuse, les globules amorphes orangés (GAO), la MOA grumeleuse, les cuticules et membranes, les ligno-cellulosiques opaques et les spores et pollens.

**Tableau V.2-6** : Profondeur des échantillons étudiés en pétrographie (en cm):

0,5	49,5	109,5	169,5	224,5	284,5	339,5	399,5
4,5	59,5	114,5	174,5	229,5	289,5	344,5	404,5
9,5	64,5	124,5	179,5	234,5	294,5	349,5	409,5
14,5	69,5	129,5	189,5	239,5	299,5	354,5	414,5
19,5	74,5	134,5	194,5	249,5	304,5	359,5	419,5
24,5	79,5	144,5	199,5	254,5	314,5	364,5	424,5
29,5	84,5	149,5	204,5	259,5	319,5	374,5	429,5
34,5	89,5	154,5	209,5	264,5	324,5	379,5	439,5
39,5	94,5	159,5	214,5	269,5	329,5	384,5	444,5
44,5	104,5	164,5	219,5	279,5	334,5	394,5	449,5
							454,5

Les fractions d'origine marine sont très largement supérieures (> 90%) à celles d'origine continentale, comme le montrent les proportions moyennes de chaque classe dans le tableau V.2-7. La domination de la MOA gélifiée, de la MOA floconneuse et des GAO, bien caractéristiques des environnements d'*upwelling*, atteste la forte productivité locale avec un degré élevé de préservation. Les fractions terrestres (C-M, LCO, et Sp-Po) semblent être liées à des apports éoliens.

**Tableau V.2-7** : Abondance moyenne des fractions palynologiques rencontrées dans la carotte B13, classées par ordre décroissant, et descriptif statistique basique.

	<i>Origine supposée</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Minimum</i>	<i>Maximum</i>	<i>Ecart-type</i>
<i>MOA* gélifiée (MOAGel)</i>	Mar**	54,52	21,85	71,25	10,38
<i>MOA floconneuse (MOAFlo)</i>	Mar	29,41	12,12	63,98	9,82
<i>Globules amorphes orangés (GAO)</i>	Mar	4,47	0,95	15,86	3,10
<i>Cuticules et membranes (C-M)</i>	Ter***	3,86	0,05	33,41	4,65
<i>MOA grumeleuse (MOAGru)</i>	Mar	3,56	0,00	36,13	6,69
<i>Pyrite</i>	Marine	2,08	0,77	4,30	0,71
<i>Ligno-cellulosiques opaques (LCO)</i>	Ter	0,52	0,09	1,61	0,33
<i>Spores-pollens (Sp-Po)</i>	Ter	0,47	0,00	5,64	0,99
<i>Algues (Alg)</i>	Mar	0,38	0,00	3,56	0,64
<i>Débris gélifiés (DG)</i>	Ter	0,29	0,00	2,59	0,47
<i>Zooplankton (Zoo)</i>	Mar	0,26	0,00	3,53	0,64
<i>MOA rougeâtre (MOARou)</i>	Ter	0,15	0,00	1,04	0,22
<i>MOA opaque (MOAOPA)</i>	Ter	0,02	0,00	0,60	0,08
<i>Mycellium (Myc)</i>	Mar	0,01	0,00	0,72	0,08
<i>Pyrofusinites (Pyrof)</i>	Ter	0,00	0,00	0,18	0,02
<i>Ligno-cellulosiques translucides (LCT)</i>	Ter	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Ligno-cellulosiques amorphes (LCA)</i>	Ter	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Dinoflagellés (Din)</i>	Mar	0,00	0,00	0,00	0,00

Obs. :\* MOA – matière organique amorphe ; \*\* Mar – marine ; \*\*\* Ter – terrestre

La variation en fonction de la profondeur des pourcentages relatifs de ces fractions est portée sur la figure V.2-8, et montre également l'existence de cinq unités lithologiques.

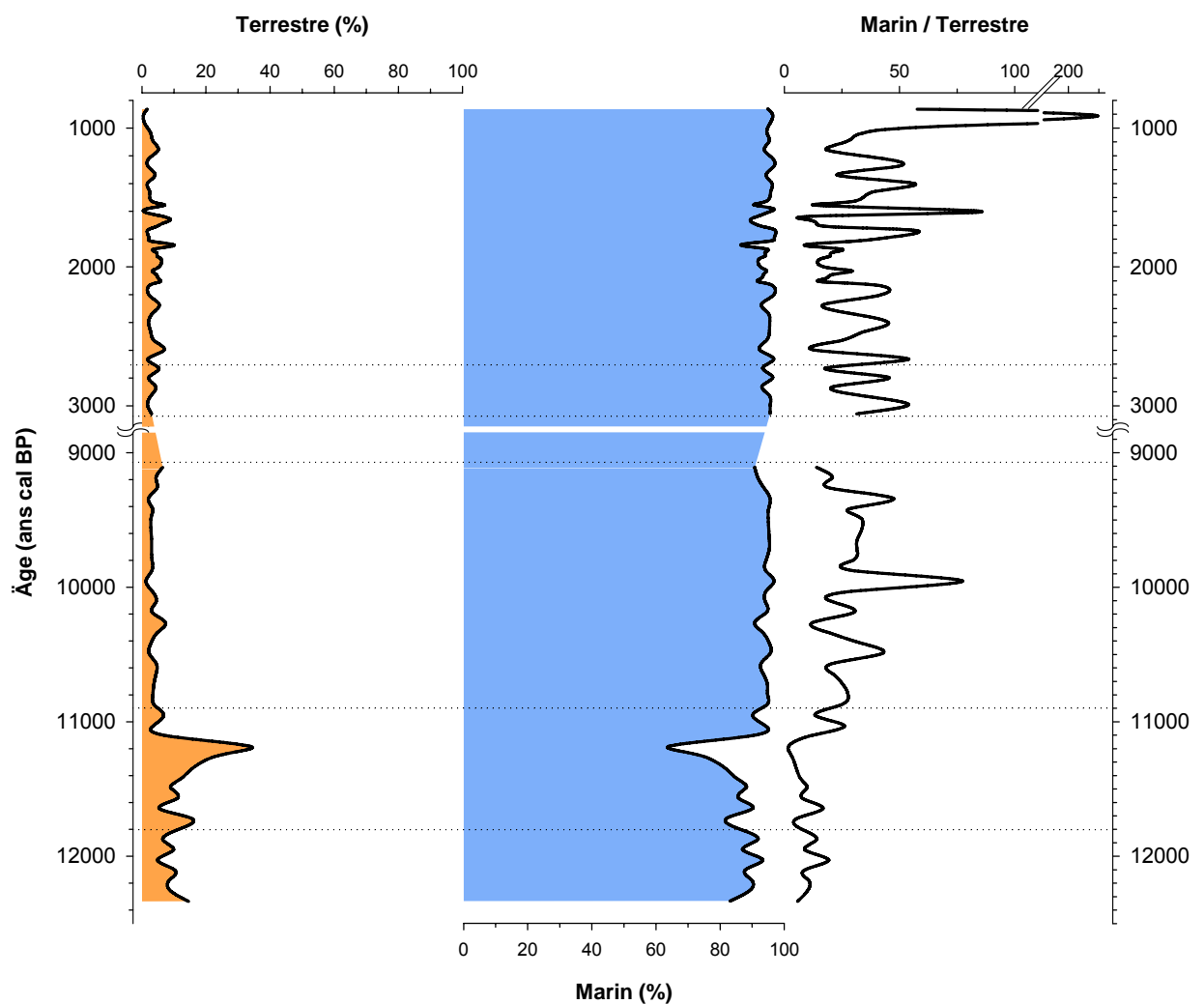
- **Unité I** - (460 - 404 cm, 12 400 – 11 800 ans cal BP) – Dans cette unité, les fractions autochtones sont dominées par la fraction MOAGel, qui varie autour de 60%, et par celle de la MOAFlo qui varie autour de 30%. Les fractions allochtones quant à elles sont plutôt dominées par la présence des cuticules membranes qui présentent des pourcentages autour de 8%.

- **Unité II** - (420 - 361 cm, 11 800 – 10 900 ans cal BP). À part le maintien des deux fractions majoritaires d'origine autochtone représentées par la MOA-Gel et MAO-Flo, cette unité est caractérisée principalement par l'augmentation importante des cuticules membranes qui passent de 8% à 30%. Il est important de noter la présence des pyrofusinites dans cette unité.
- **Unité III** - (361 - 240 cm, 11 560 – 9 040 ans cal BP). Cette unité se différencie des précédentes par la stabilité des fractions organiques autochtones, qui varient respectivement autour de 60% pour la MOAGel et 35% pour la MOAFlo. Les cuticules quant elles, après avoir baissé, varient autour de 2%. Il est important de noter, au sommet de cette unité, l'augmentation des fractions zooplancton atteignant des pourcentages de 3% ;
- **Unité IV** - (240 - 212 cm, 3 060 – 2 700 ans cal BP) - Tous les pourcentages des différentes fractions organiques sont stables (MOAGel 60%, MOAFlo 35%, C-M 2%).
- **Unité V** - (212 - 0 cm, 2 700 – 860 ans cal BP) - Dans cette unité, on assiste à la diminution progressive et importante de la MOAFlo (de 35 à 10%) au profit de la GAO qui augmente vers le sommet, atteignant des pourcentages autour de 15%. En plus de l'augmentation de la GAO, on note l'apparition vers 1700 ans BP d'une nouvelle fraction organique représentée par la MOAGru qui reste stable et varie autour de 15% jusqu'au sommet. Dans cette unité, la MOAGel présente une plus grande variabilité, autour de 50%. De même que pour la MOAGel, les cuticules et membranes présentent des pourcentages plus stables à la base, autour de 3%, avec plus de variabilité de 1 à 8% au milieu de l'unité, puis une diminution au

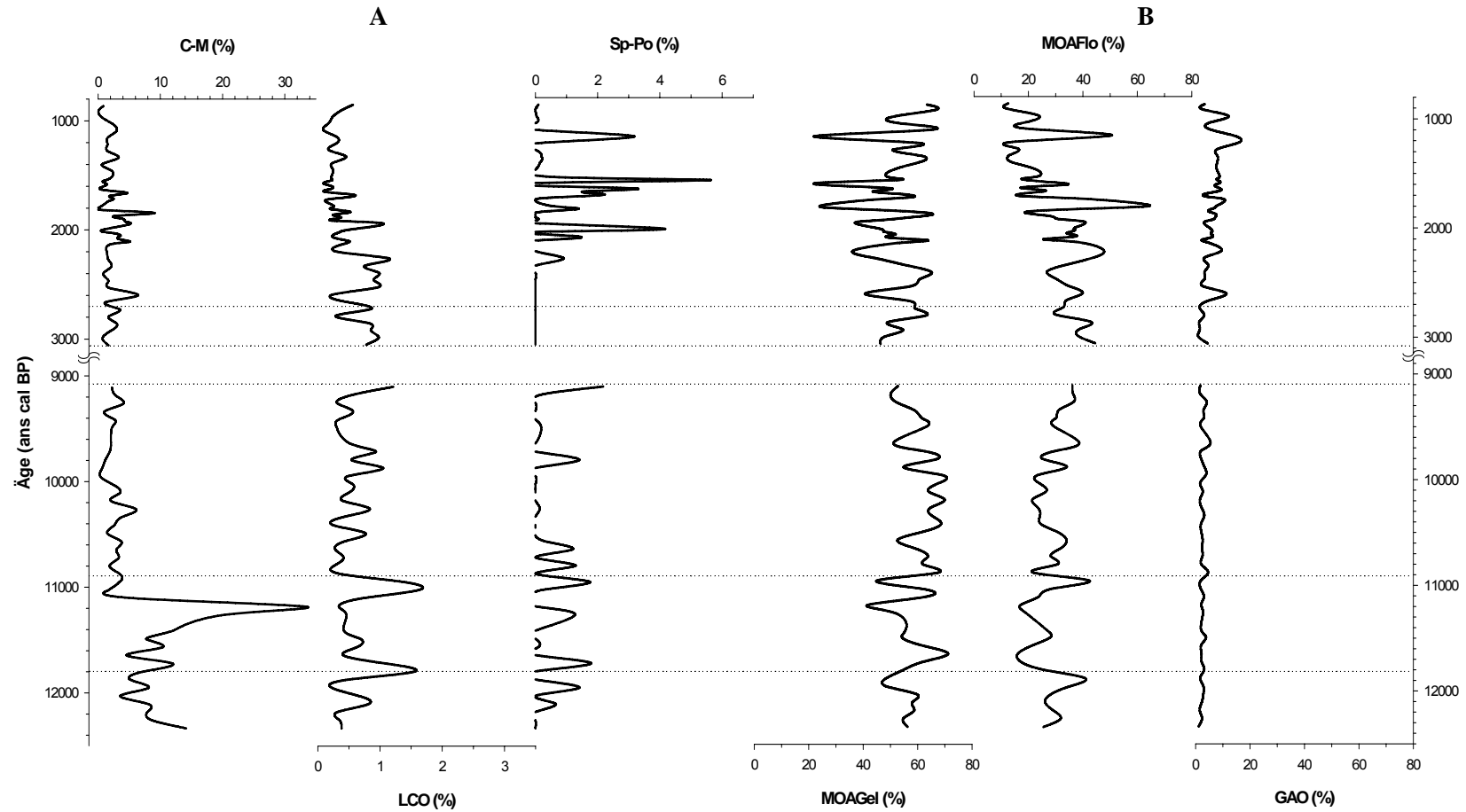


sommet. Il est à noter qu'à partir du milieu de l'unité V, les spores et pollens sont beaucoup plus présents, atteignant 5%. Enfin, les LCO affichent une tendance à la réduction de la base (où on les trouve à hauteur de 1%), vers le sommet, où ils tendent à disparaître.

La totalité des profils de distribution en fonction de la profondeur des fractions est montrée en annexe.



**Figure V.2-8 :** Distribution selon la profondeur des proportions relatives des fractions palynologiques selon les deux sources supposées, terrestre et marine (allochtone/autochtone), et leur rapport.



**Figure V.2-9 :** Évolution des proportions relatives en fonction de la profondeur des trois principales fractions de chaque origine allochtone (terrestre) (A)\* et autochtone (marine) (B)\*\* respectivement, pour la carotte B13.

\* C-M – cuticules et membranes ; LCO – ligno-cellulosiques opaques ; et, spores et pollens ;

\*\* MOAGel – matière organique amorphe gélifiée ; MOAFlo – matière organique amorphe floconneuse ; et, GAO – globules amorphes orangés.

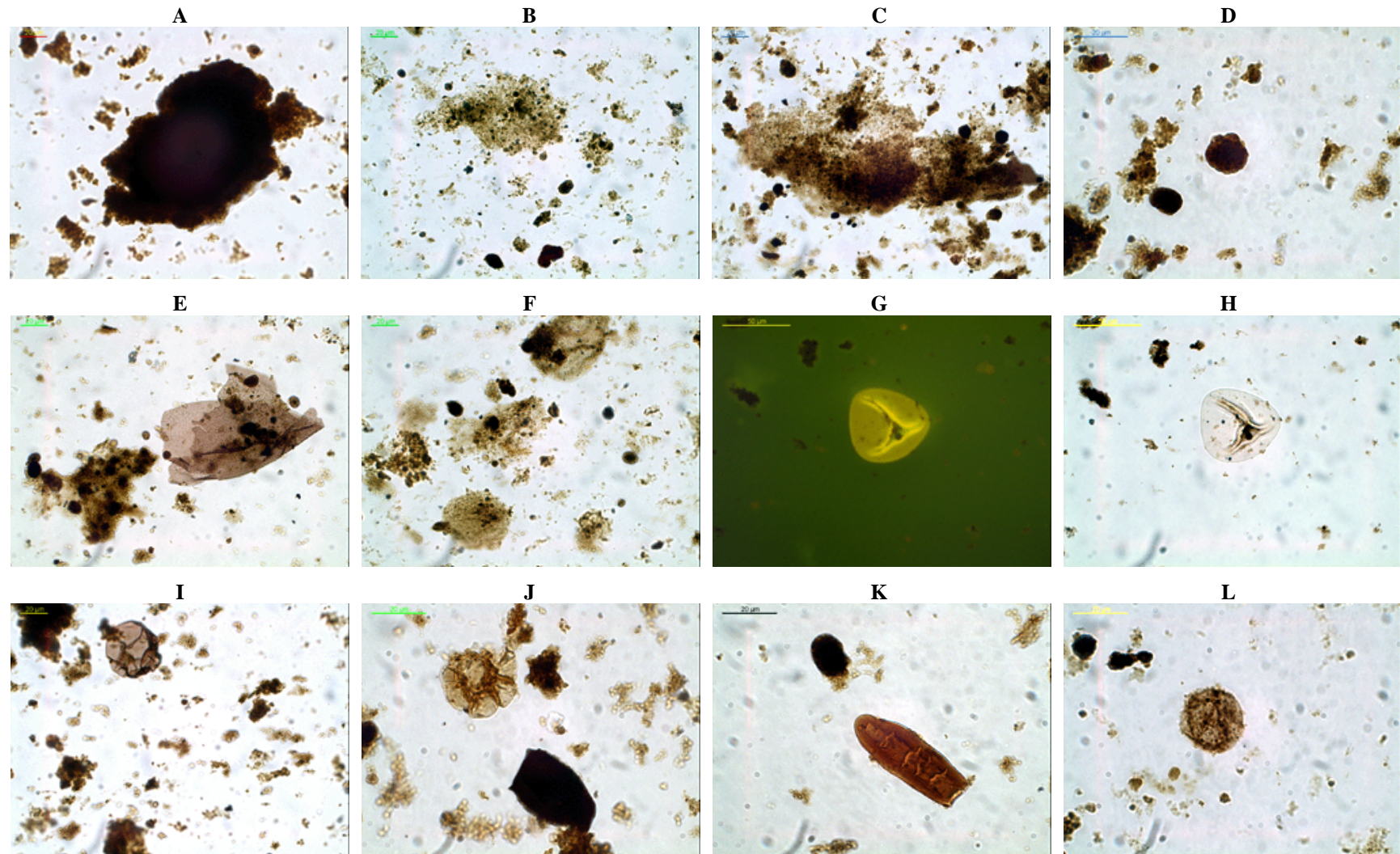


Figure V.2-10 : Exemples des classes de palynofaciès rencontrés dans les sédiments de la carotte B13.

**Légende de la figure V.2-10 :**

- A** – MOA grumeleuse (19-20 cm, 50x) ;
- B** – MOA floconneuse (109-110 cm, 50x) ;
- C** – MOA gélifié (54-55 cm, 50 x) ;
- D** – Globules amorphes orangés (49-50 cm, 100x) ;
- E** – Cuticule-membrane (204-205 cm, 50x) ;
- F** – MOA grumeleuse sur fond de MOA floconneuse (104-105 cm, 50x) ;
- G et H** – Pollen (en fluorescence à gauche, et transmission à droite) (129-130 cm, 50 x) ;
- I** - Spore (144-145 cm, 50 x) ;
- J** – Foraminifère + débris gélifié (299-300 cm, 100x) ;
- K** – Mycelium (299-300 cm, 100x);
- L** - Dinoflagellé sur fond de MOA floconneuse (24-25 cm, 100x).

## **V.2.6. Distribution des marqueurs moléculaires**

### **V.2.6.1. Les n-alcanes**

Les n-alcanes rencontrés dans les sédiments de Callao sont constitués de molécules portant de 16 à 34 atomes de carbone. La distribution de ces n-alcanes montre deux groupes distincts, avec des caractéristiques et des comportements différents. Un premier groupe est composé par des hydrocarbures à courte chaîne, de 16 à 23 carbones, et un second regroupe les chaînes hydrocarbonées les plus longues, de 24 à 34 carbones. Ces groupes seront dorénavant désignés par les dénominations suivantes : n-alcanes courts ( $C_{16} - C_{23}$ ) et n-alcanes longs ( $C_{24} - C_{34}$ ), respectivement.

Dans la figure V.2-11, les n-alcanes ont été regroupés en quatre familles dont les origines sont différentes : A – les n-alcanes courts impairs d'origine plutôt phytoplanctonique ; C – les n-alcanes courts pairs, d'origine bactérienne/microbienne ; et B et D les n-alcanes longs qui ont comme source les végétaux supérieurs.

La figure V.2-12 montre différents rapports obtenus à partir de la distribution des n-alcanes : A – la somme totale des n-alcanes, dont le gris foncé représente la contribution des n-alcanes longs à la somme totale des n-alcanes, et le gris clair la partie correspondant aux n-alcanes courts ; B – l'indice de préférence de carbone des n-alcanes courts et longs ; et C – la longueur moyenne des chaînes de n-alcanes longs et de n-alcanes courts.

D'une manière générale les n-alcanes longs sont largement majoritaires tout au long de la carotte, exception faite de l'unité basale. Les chaînes plus courtes ( $C_{16}$  à  $C_{19}$ ) sont absentes dans la partie supérieure de la carotte (unité V), diminuant graduellement depuis le début de l'unité III pour disparaître totalement au début de l'unité V. On retrouve un schéma similaire pour les distributions du Pristane et du Phytane.

- **Unité I** - (460 - 404 cm, 12 400 – 11 800 ans cal BP) – Cette unité est caractérisée par de fortes concentrations des n-alcanes courts pairs (1,67 ng\*g<sup>-1</sup> en moyenne), tandis que les n-alcanes courts impairs sont dix fois moins concentrés (0,14 ng\*g<sup>-1</sup>). Les autres profils (n-alcanes longs pairs et impairs) sont plus stables et présentent des concentrations relativement basses dominées par les chaînes impaires (0,68 ; et 1,08 ng\*g<sup>-1</sup>, respectivement) ;
- **Unité II** - (420 - 361 cm, 11 800 – 10 900 ans cal BP) – Les concentrations des n-alcanes courts pairs subissent une réduction graduelle dans cette unité, d'environ 4 à 0,3 ng\*g<sup>-1</sup>, et les n-alcanes courts impairs demeurent stables, variant autour de 0,15 ng\*g<sup>-1</sup> en moyenne. Les n-alcanes longs impairs et pairs augmentent légèrement et restent stables, fluctuant autour de 1,65 et 1,12 ng\*g<sup>-1</sup> respectivement ;
- **Unité III** - (361 - 240 cm, 11 560 – 9 040 ans cal BP) – La somme des n-alcanes courts pairs maintient la tendance de réduction vers le sommet, pendant que la somme des chaînes courtes impaires tend

à augmenter, chaque profil affichant des moyennes de 0,44 et 0,23  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ , avec une plus grande variabilité des deux courbes au sommet de l'unité. Les n-alcanes longs pairs et impairs, toujours stables mais comme pour les chaînes courtes plus variables au sommet de l'unité, présentent des teneurs moyennes respectives de 1,29 et 1,89  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$  ;

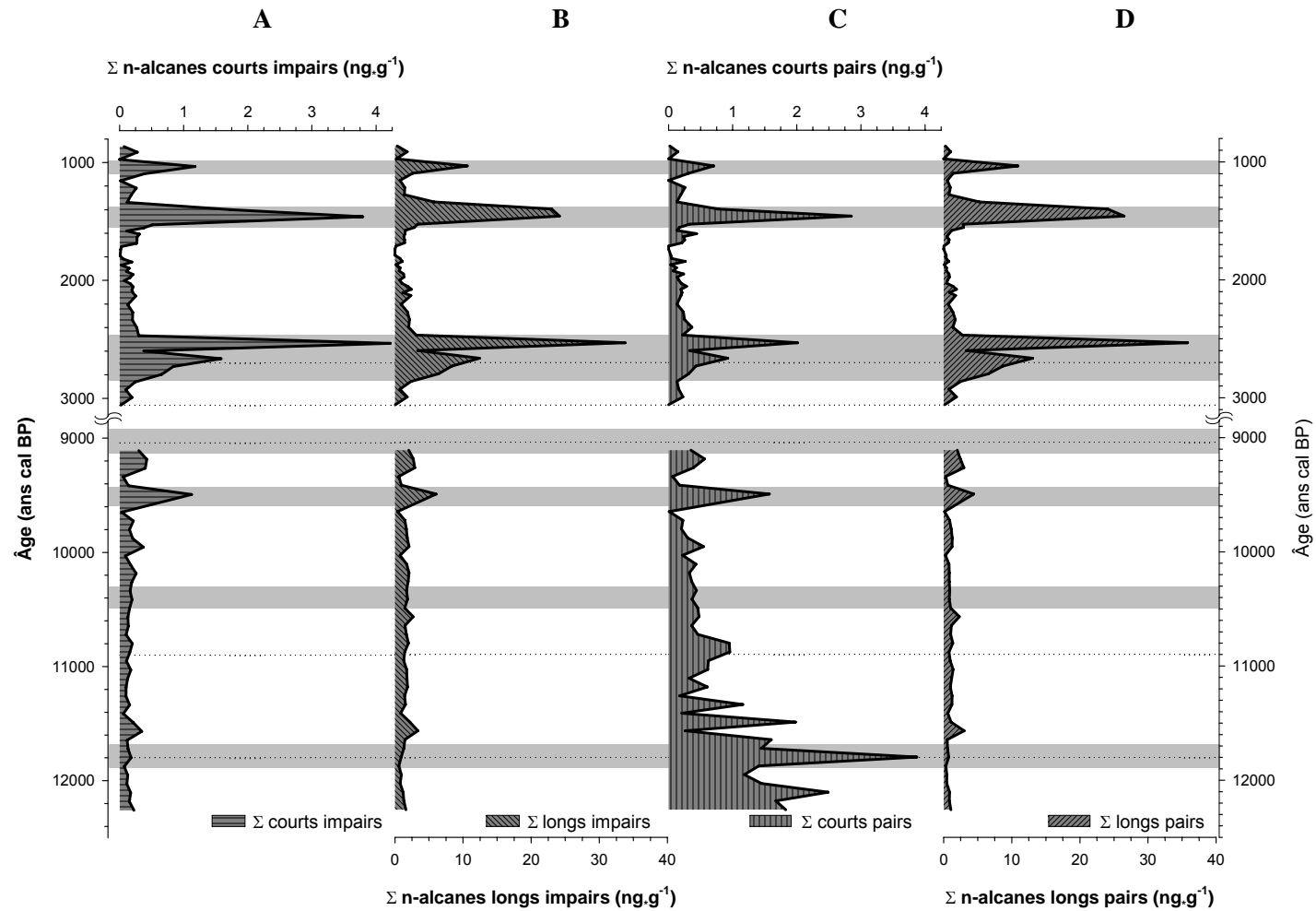
- **Unité IV** - (240 - 212 cm, 3 060 – 2 700 ans cal BP) – Toutes les courbes montrent des augmentations progressives des concentrations vers le sommet. Les évolutions des sommes des concentrations des n-alcanes sont détaillées ainsi : courts pairs, de 0,02 à 0,84  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$  ; courts impairs, de 0,13 à 0,42  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$  ; longs pairs, de 0,17 à 8,71  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$  ; et longs impairs, de 0,06 à 8,37  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$  ;
- **Unité V** - (212 - 0 cm, 2 700 – 860 ans cal BP) – Les variabilités des concentrations des quatre groupes sont beaucoup plus fortes que dans le restant de la carotte. Trois pics majeurs de concentration sont présents dans tous les profils : à 2 500, 1 500 / 1 400, et 1 000 ans cal BP. Par ailleurs, un minimum de concentration globale est repéré autour de 1 700 / 1 800 ans cal BP.

En ce qui concerne les paramètres calculés à partir de la distribution des n-alcanes, la quantité totale est stable durant les unités I, II et III, variant autour de 3,85  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ , tandis que durant les unités sommitales (IV et V) les quantités varient entre 0,05 et 75,86  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ .

Les indices de préférence de carbone (CPI) des n-alcanes courts dans les unités I et II sont très bas, du fait de la domination des chaînes paires ; dans l'unité III ils affichent une augmentation vers le sommet (de 0,25 à 0,80), et finalement dans les unités IV et V ils fluctuent autour de 1. Pour les n-alcanes longs, les CPI sont beaucoup plus variables. Dans la partie inférieure de la carotte (unités I, II et III), les

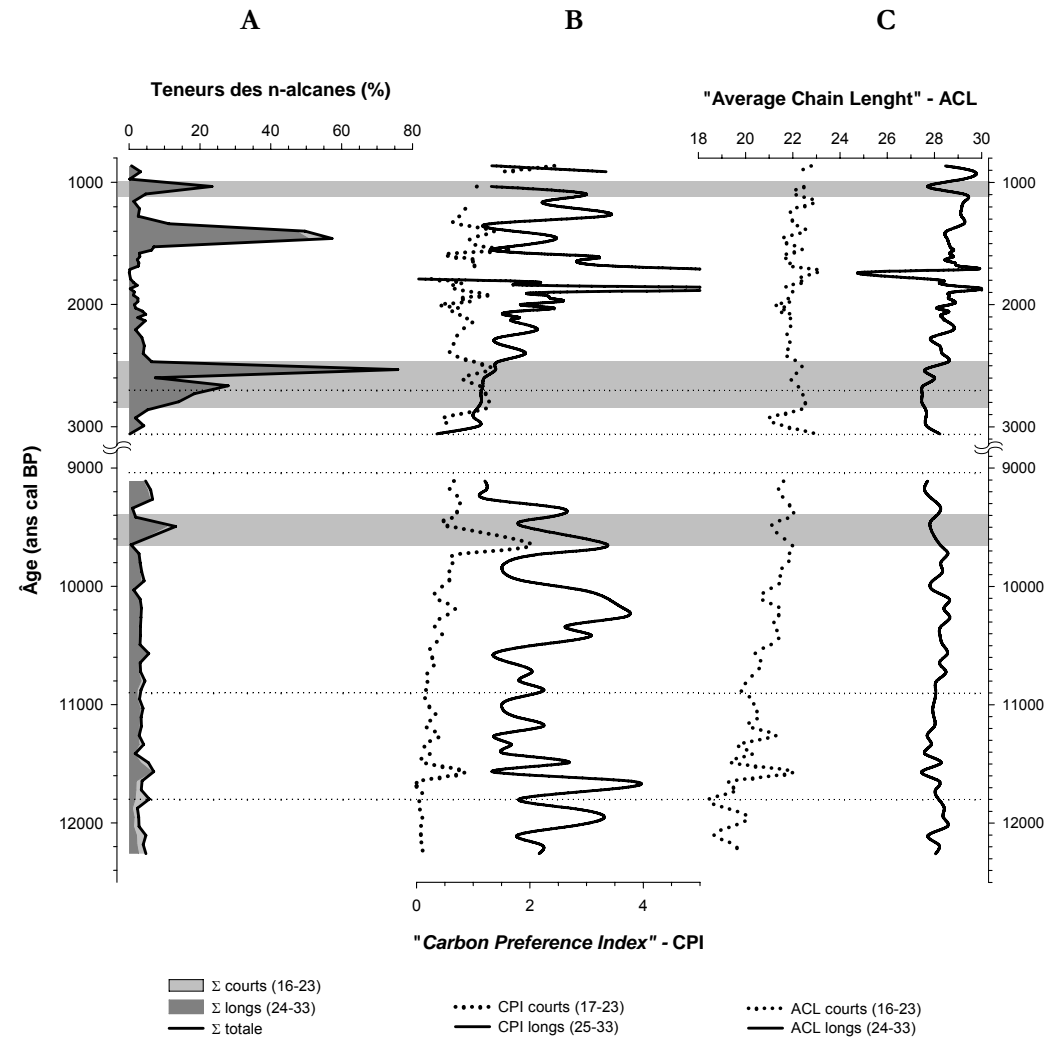
variations sont larges autour de 2,20. Les valeurs les plus importantes sont rencontrées entre les unités I et II, et au milieu de l'unité III (environ 4) ; les minimums se situent dans l'unité II et aux extrêmes de l'unité III (environ 1,50).

La longueur moyenne de chaîne (ACL) des n-alcanes courts présente une élongation croissante progressive, de 18 à 22 carbones, depuis la base de la carotte jusqu'à la fin de l'unité III (9 040 ans cal BP), tandis que dans toute la partie supérieure (unité IV et V) l'ACL gravite autour de 22. Les chaînes longues montrent une évolution « synodale », autour de 28, durant les unités I, II, III, et IV, avec les maximums à 12 000 et 10 200 ans cal BP et les minimums à 11 400 et à 9 100 ans cal BP. L'unité V, à son tour, dessine un incrément de 28 à 30 dans l'ACL, entre sa base et son sommet.



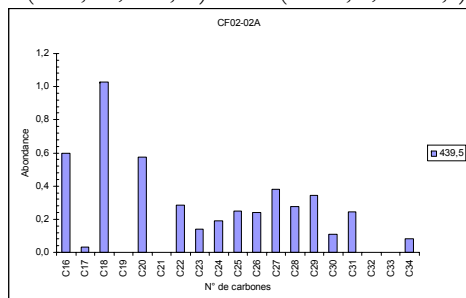
**Figure V.2-11** : Distribution, en fonction de l'âge, des concentrations des n-alcanes selon la longueur des chaînes et selon leur nombre pair ou impair de carbones.



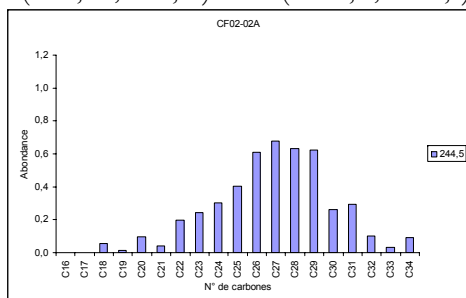


**Figure V.2-12** : Profils de : **A** – la teneur en n-alcanes courts, en n-alcanes longs et la teneur générale en n-alcanes ; **B** –de l'indice de préférence de carbone CPI; et **C** – de la longueur moyenne des chaînes, le long de la carotte B13.

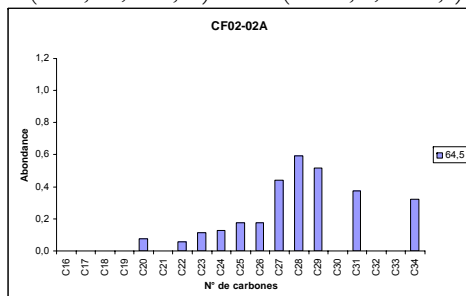
**A – (439-440 cm)**  
CPI (C=0,08 ; L=2,16) ACL (C=18,7 ; L=27,7)



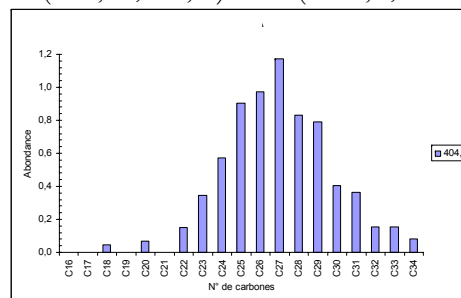
**D – (244-245 cm)**  
CPI (C=0,66 ; L=1,21) ACL (C=21,6 ; L=27,7)



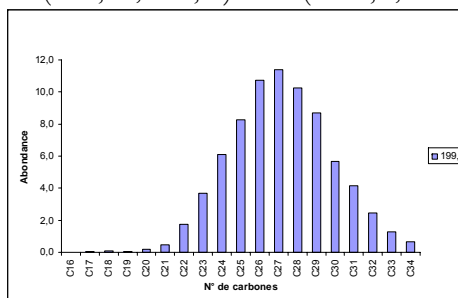
**G – (64-65 cm)**  
CPI (C=0,64 ; L=1,99) ACL (C=21,8 ; L=28,6)



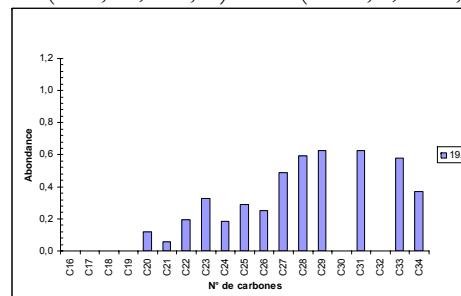
**B – (404-405 cm)**  
CPI (C=0,87 ; L=1,33) ACL (C=22,1 ; L=27,4)



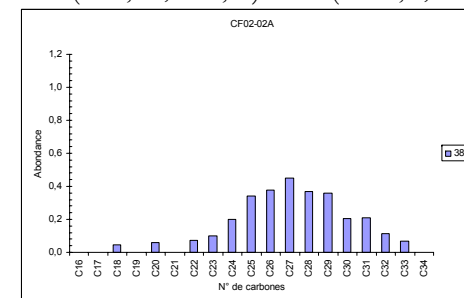
**E – (199-200 cm)**  
CPI (C=1,31 ; L=1,40) ACL (C=22,4 ; L=27,6)



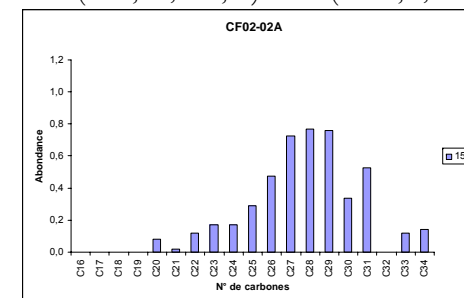
**H – (19-20 cm)**  
CPI (C=1,01 ; L=3,00) ACL (C=22,0 ; L=29,2)



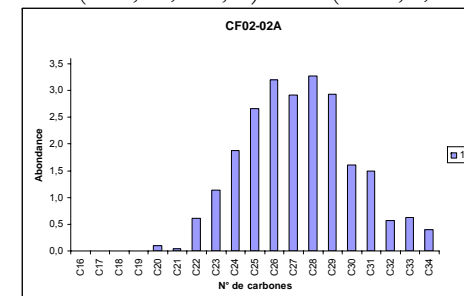
**C – (384-385 cm)**  
CPI (C=0,42 ; L=1,37) ACL (C=21,3 ; L=27,5)



**F – (159-160 cm)**  
CPI (C=0,76 ; L=1,53) ACL (C=22,0 ; L=28,3)



**I – (14-15 cm)**  
CPI (C=1,06 ; L=1,32) ACL (C=22,5 ; L=27,7)

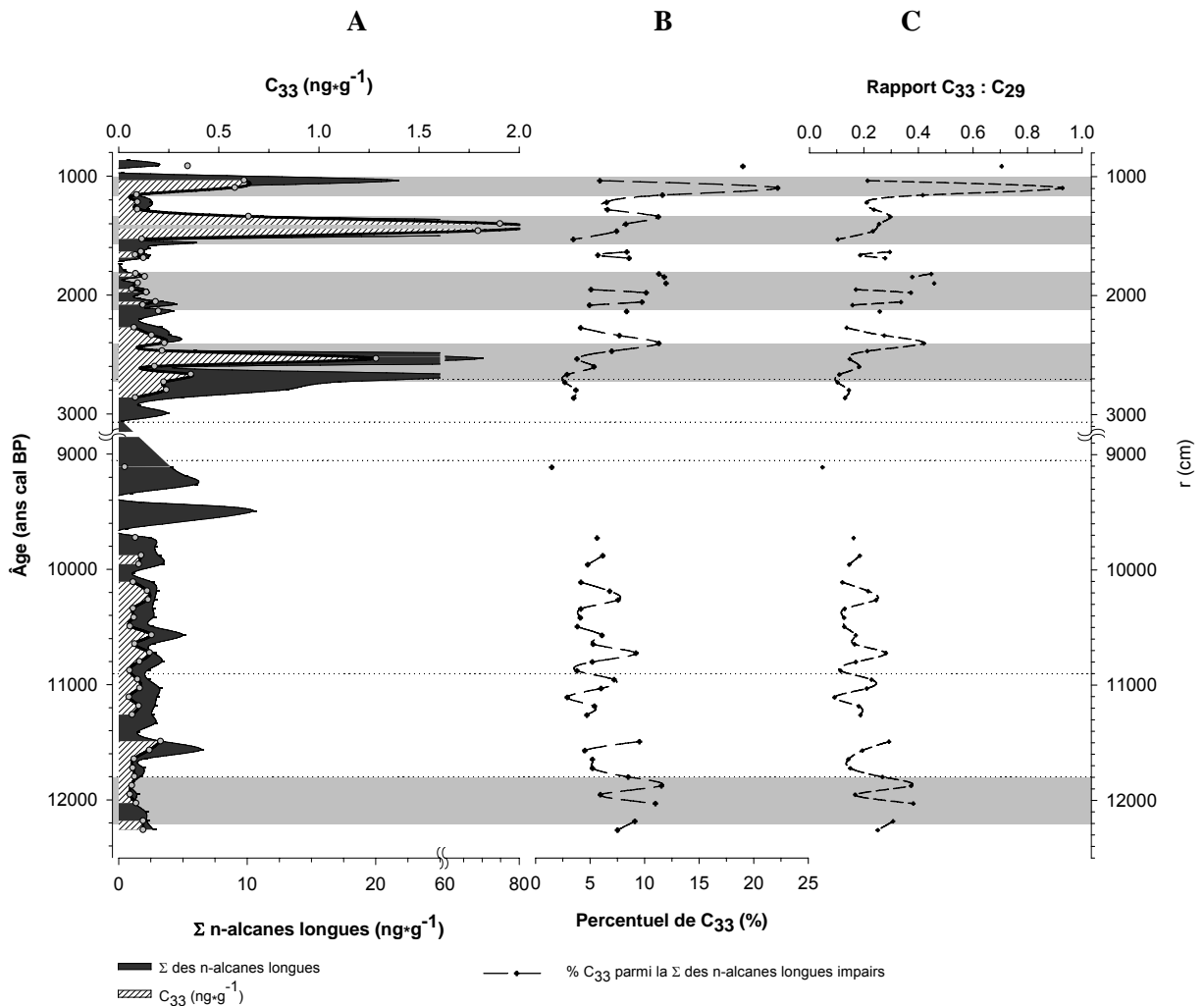


**Figure V.2-13 : Quelques exemples de distribution des n-alcanes le long de la carotte B13.**

### **Le C<sub>33</sub> en tant que marqueur d'aridité sur les zones sources de la MOS**

Le C<sub>33</sub> peut être utilisé comme indicateur d'aridité dans les zones source de la fraction longue des n-alcanes retrouvés dans les sédiments. Les plantes terrestres répondent au renforcement des conditions arides par le rallongement des chaînes qui composent les cires revêtant leur feuillage, ce qui réduit la perte d'eau vers l'environnement extérieur. Une augmentation de la proportion de C<sub>33</sub> parmi les n-alcanes longs impairs indique ainsi une aridification des conditions du milieu continental source.

Le profil de variation du C<sub>33</sub> le long de la carotte B13 est similaire à celui de la somme des n-alcanes longs (C<sub>24</sub> à C<sub>34</sub>) (figure V.2-14 A) : dans la partie inférieure de la carotte (unités I, II et III), les proportions de C<sub>33</sub> dans la somme totale des alcanes affichent une réduction de la base vers le sommet (figure V.2-14 B). La partie post-hiatus de la carotte (unités IV et V) affiche une augmentation claire des proportions de C<sub>33</sub> (entre 2 900 et 900 ans cal BP), composée de séquences successives d'augmentation et de diminution.



**Figure V.2-14 :** **A** - Comparaison entre le profil de concentration du n-alcane  $C_{33}$  et la somme des concentrations des n-alcanes longs impairs ; **B** – proportion du n-alcane  $C_{33}$  en relation à la quantité de n-alcanes longs impairs ; **C** – rapport entre le n-alcane  $C_{33}$  et le n-alcane long majoritaire ( $C_{29}$ ), le long de la carotte B13.

#### IV.2.6.2. Les alcénones

Les sédiments de Callao étant très riches en carbone organique et les quantités d'échantillon disponibles pour les analyses étant restreintes, nous avons été amené à conduire des essais pour réduire le poids de sédiment à extraire pour les analyses d'alcénones.. Ce poids a été réduit à 0,5 g sans perte de qualité des chromatogrammes pour les échantillons impliqués dans l'essai. À la place de la séparation manuelle sur mini-colonnes, nous avons utilisé le système automatique de séparation en phase solide *RapidTrace® SPE<sup>17</sup> Work Station* (Caliper Life Sciences). La méthodologie de séparation est la même que celle appliquée pour les sédiments du Cabo Frio (adaptée de Ternois *et al.*, 1998), et mise au point par Harada *et al.* (2006) pour l'application sur le *RapidTrace*. Un effort supplémentaire d'augmentation de la résolution des analyses des alcénones a été mené sur le premier mètre de carotte (0 à 116 cm), pour lequel un échantillon sur deux a été analysé, au lieu d'un sur cinq pour le restant de la carotte. L'extraction a été effectuée avec le système automatique d'extraction solide ASE 300<sup>18</sup> (DIONEX) (1000 psi, méthode standard,  $\text{Cl}_2\text{CH}_3 + \text{OHCH}_3$  {1:1<sub>V:V</sub>} comme solvant), avant séparation manuelle, conformément à la méthodologie appliquée aux sédiments du Cabo Frio.

Les alcénones ont été identifiées par CG-SM et quantifiées par CG-FID. Les standards internes utilisés pour la quantification sont ceux le plus couramment employés, c'est-à-dire le 5- $\alpha$ -Cholestane et le Squalane. Les températures, calculées d'après l'équation de Müller *et al.* (1998) à partir de la concentration des alcénones, montrent une moyenne globale des températures de 21,6°C, variant entre des extrêmes de 16,3°C et 25,2°C avec un écart-type de 1,29°C.

	<b>Moyenne</b>	<b>Maximum</b>	<b>Minimum</b>	<b>Écart-type</b>
<b>Température (°C)</b>	21,6°	25,2°	16,3°	1,29

<sup>17</sup> SPE – « solid phase extraction »

<sup>18</sup> ASE – « accelerated solvent extraction system »

La température moyenne des unités baisse de 2°C entre la base et le sommet de la carotte. Le profil général montre une tendance à la baisse modérée mais constante des températures tout au long de l'unité I, pour se stabiliser autour de 22°C à partir de 11 800 ans (unités II et III), la variabilité restant marquée durant toute l'unité II, pour s'amenuiser ensuite (unité III). *A contrario*, l'unité V est caractérisée par des variations à la fois élevées et rapides des températures (fortes variabilités et fréquences).

Le détail du comportement de la température au sein de chacune des unités stratigraphiques est le suivant :

- **Unité I** - (460 - 404 cm, 12 400 – 11 800 ans cal BP) – Cette unité est caractérisée par un refroidissement des températures de la base vers le sommet, de 24,4°C à 22,7°C . La base de cette unité présente en outre les températures les plus chaudes relevées pour toute la moitié inférieure de la carotte, avant le hiatus ;
- **Unité II** - (420 - 361 cm, 11 800 – 10 900 ans cal BP) – Les températures varient amplement, les valeurs extrêmes étant de 21,1°C et 23,2°C ;
- **Unité III** - (361 - 240 cm, 11 560 – 9 040 ans cal BP) – Entre la base de l'unité et 10 200 ans cal BP, la variabilité des températures est moins marquée que pour l'unité précédente, variant autour de 22°C, avec un écart-type de 0,46 °C. La seconde moitié de cette série, après 10 200 ans BP, est lacunaire, les alcénones n'ayant pas été détectés pour cette période.
- **Unité IV** - (240 - 212 cm, 3 060 – 2 700 ans cal BP) – Comme pour le sommet de l'unité précédente, aucun signal détectable des alcénones n'a pu être décelé.

- **Unité V** – (212 – 0 cm, 2 700 – 860 ans cal BP) – Les premiers  $\approx$  350 ans sont exempts de signaux détectables des alcénones. De 2 400 à 2 200 ans, et de 2 000 à 1 800 ans cal BP, les températures présentent deux tendances successives à la baisse, avec une ampleur de variation proche, de 25°C à 20,5°C pour la première période, et de 23,5°C à 20,5°C pour la deuxième. Dans la partie supérieure, les températures décrivent deux croissants successifs, baissant d’abord jusqu’aux alentours de 20°C (à 1 500 et 1 100 ans BP), puis augmentant à nouveau pour rejoindre des valeurs proches des températures initiales, autour de 23°C (valeurs atteintes à 1 700, 1 350, et 900 ans cal BP). Autre élément caractéristique pour cette unité, l’ampleur et la vitesse de changement des températures sont fortes entre 1 800 et 1 500 ans BP, et baissent ensuite.

**Tableau IV.2-8 :** Descriptif statistique de la distribution des températures, calculées en fonction des unités lithologiques de la carotte B13.

	Moyenne	Maximum	Minimum	Écart-type
Unité V	21,4	25,2	16,3	1,33
Unité IV	n.d.*	n.d.	n.d.	-
Unité III	21,9	22,8	21,4	0,46
Unité II	22,2	23,2	21,1	0,85
Unité I	23,5	24,4	22,7	0,65

\*n.d. – non détecté

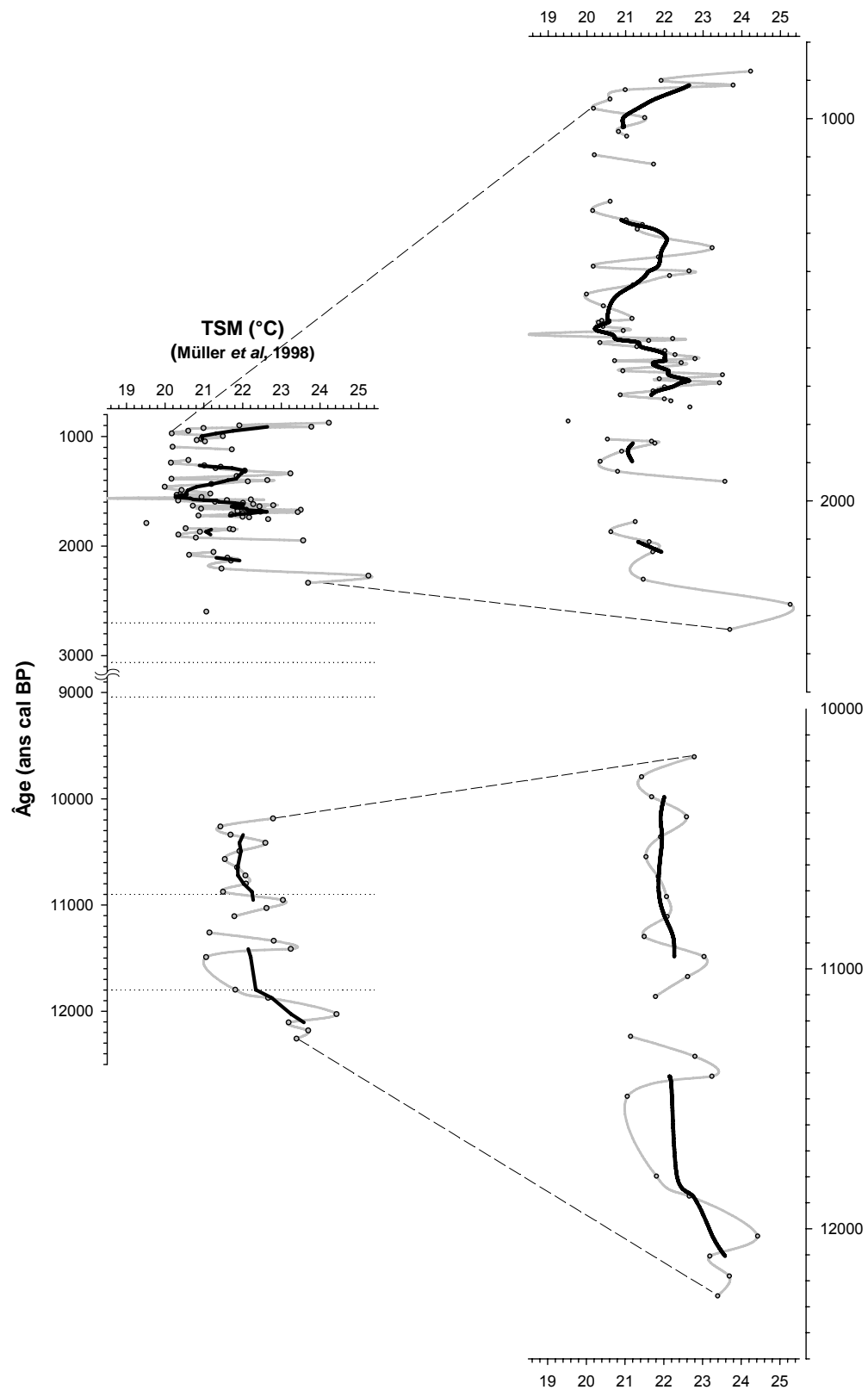


Figure V.2-15 : Paléotempératures des eaux de surface de la région du Callao.





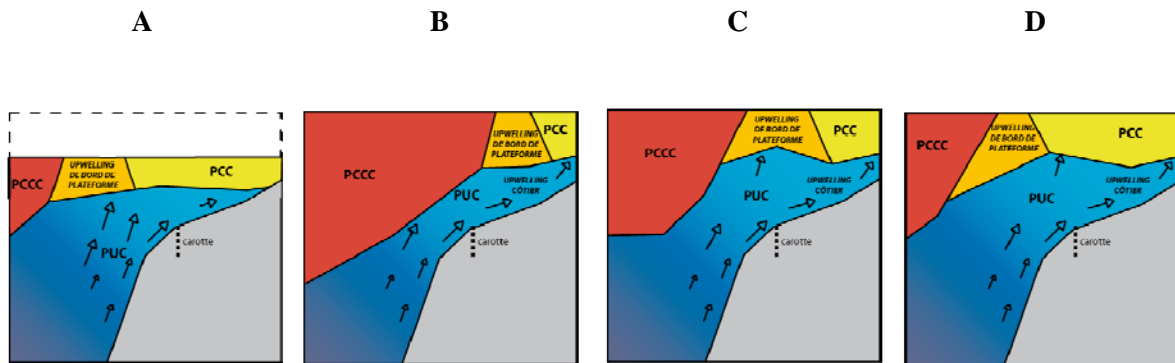
### ***V.3. Discussion***

Les données géochimiques élémentaires et pétrographiques, comparées aux unités lithologiques, montrent que les sédiments étudiés de la plateforme continentale, prélevés dans la région de Callao au Pérou, se caractérisent par la présence d'un seul type de MO pour l'essentiel d'origine marine. Cette MO sédimentaire, essentiellement de type II, présente des variations de compositions géochimiques qualitatives et quantitatives caractéristiques pour chacune des unités lithologiques décrites. Ces variations expriment de ce fait les fluctuations de la productivité liées aux variations de l'intensité de l'*upwelling* et de son influence sur les conditions physico-chimiques de la colonne d'eau et de l'interface eau-sédiment. Les variations de la plupart des paramètres obtenus suivent globalement les cinq coupures lithologiques. Ces coupures restent toutefois peu évidentes pour certains paramètres comme la distribution des n-alcanes ou de certains constituants pétrographiques, et nous amènent à regrouper quelques unités pour l'interprétation. Cependant, une discontinuité érosive importante sépare l'enregistrement organo-sédimentaire en deux parties. Les unités basales (I, II et III) présentent des caractéristiques sédimentologiques assez distinctes des unités sommitales (IV et V). La discontinuité est caractérisée par une morphologie érosive exprimée sous forme de lambeaux d'arrachements bien visibles sur l'image radioscopique, rencontrés à 240 cm de profondeur. Elle exprime un hiatus, daté de 9 040 à 3 060 ans cal BP, d'une durée globale de 5 080 ans.

D'une manière générale, la moitié inférieure de la carotte (unités I à III) montre des sédiments plus riches en fractions minérales, comme en témoignent des valeurs plus élevées de densité et de niveaux de gris. Ce type de dépôt serait probablement associé à des conditions hydrodynamiques plus intenses, les formes sédimentaires observées sur les images radioscopiques le prouvent.

Le modèle d'âges  $^{14}\text{C}$  dans la partie inférieure de la carotte (unités I, II et III) met en évidence deux courbes de variation des taux de sédimentation : l'une de 13 970 à 11 940 ans cal BP et l'autre de 12 360 à 10 600 ans cal BP. La deuxième témoigne

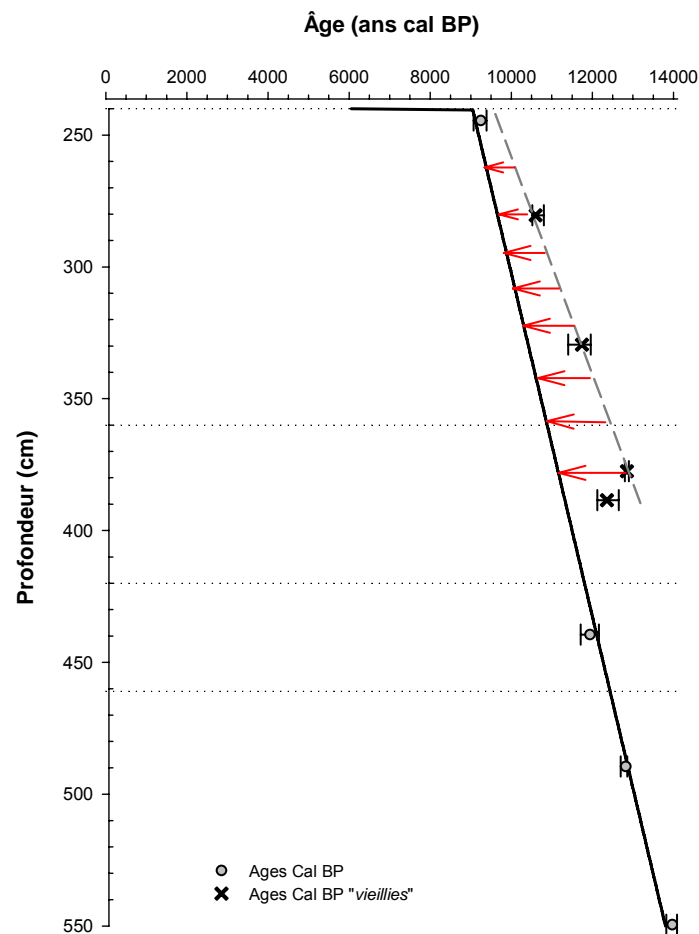
d'un vieillissement des âges dans les deux unités supérieures de cette partie de la carotte, plus important à la base qu'au sommet. Ce vieillissement est probablement une conséquence de la variation eustatique du niveau marin. Le niveau minimum le plus récent a été atteint durant le dernier maximum glaciaire (20 000 ~ 18 000 ans BP), de l'ordre de 100 à 120 m plus bas que l'actuel, comme cela a été décrit à Tahiti et aux Barbades (Fairbanks, 1990 et 1992 ; Bard *et al.*, 1996 ; Peltier & Fairbanks, 2006 ; Deschamps 2008). Ceci explique que lors de la mise en place de l'unité I, contemporaine du tardi-glaciaire, la cellule de productivité de l'*upwelling* était déplacée plus vers le large (figure V.3-1). De ce fait, l'influence de l'*upwelling* était moins intense, voire presque nulle dans la zone où a été prélevée la carotte, et par conséquent, les âges de cette unité sont moins affectés par l'effet réservoir. La remontée du niveau de la mer, amorcée durant le Post-glaciaire a dû, à partir de la mise en place de la seconde unité, favoriser l'installation de l'*upwelling* au niveau de la zone étudiée, ce qui expliquerait le vieillissement des âges affectés par un effet réservoir plus significatif.



**Figure V.3-1 :** représentation schématique de la dynamique spatiale de l'*upwelling*, montrant la situation paléo-océanographique de bas niveau marin pendant le dépôt de la première moitié de la carotte (A), et comparée aux différents scénarios actuels sur la disposition de la cellule d'*upwelling* (B, C et D). Le schéma C correspondrait à la situation environnementale de dépôt de l'unité V.

On peut alors supposer que l'extrapolation des taux de sédimentation à partir de la première courbe (trois premières datations réalisées sur les niveaux 439-440, 489-

490, et 549-550 cm) est la plus adéquate. L'inclinaison entre cette droite et la deuxième courbe correspond aux valeurs des vecteurs (flèches rouges sur la figure V.3-2) représentant l'effet réservoir et qui a pu affecter les âges de ces unités. La diminution des valeurs du vieillissement des âges vers le sommet de cette unité peut être expliquée par la diminution de la productivité, et donc de l'intensité de l'*upwelling* qui a tendance à fournir du « vieux carbone ». Ceci peut être lié à un affaiblissement progressif des vents favorables à l'*upwelling*, suite à la réduction du contraste de pression atmosphérique entre le continent et l'océan. Ceci est le résultat des changements dans l'insolation et donc des paramètres orbitaux de la terre (Rein *et al.*, 2005).



**Figure V.3-2 :** Chronologie de la base de la carotte B13, montrant le décalage entre le modèle d'âge et les datations présentant un effet de vieillissement. Les flèches rouges représentant ce décalage se réduisent vers le sommet et illustrent la baisse de l'effet réservoir océanique régional.

Il est important de préciser que les taux de sédimentation des trois premières unités sont moins élevés que ceux calculés au sommet de la carotte après le hiatus. Ceci est lié au fait que dans la partie inférieure de la carotte, à cette époque, la productivité organique était relativement plus faible. Cependant les marqueurs organiques de cette moitié de la carotte montrent une certaine stabilité des conditions environnementales.

L'unité IV est particulière, elle montre des valeurs radicalement plus élevées des niveaux de gris et de la densité. Cette unité est probablement à mettre en relation avec des dépôts de type « turbiditique ». La moitié supérieure de la carotte (unité V) montre au contraire des sédiments moins riches en fractions minérales (que les unités I, II et III) comme en témoignent les valeurs plus bas de densité et de niveaux de gris. Ce type de dépôt est vraisemblablement lié à des conditions hydrodynamiques plus stables et moins énergiques que pour la moitié inférieure de la carotte. Ceci est particulièrement visible grâce à l'aspect bien laminé de cette partie la carotte. La présence de lamines et de bandes plus ou moins claires souligne des conditions favorables à la préservation de la MO, probablement liées à variations des conditions redox à l'interface eau-sédiment..

Les résultats des analyses Rock-Eval révèlent que globalement la MO sédimentaire de la plateforme centrale du Pérou est homogène et présente des signatures pseudo van-Krevelen de type II (d'origine marine). Ces résultats géochimiques globaux mettent en évidence deux ensembles géochimiques différents, à la fois par la quantité et par la qualité de la MOS, et correspondent à l'exception de l'unité IV aux deux parties *ante.* et *post* Hiatus.

Les unités I, II et III forment un ensemble dont les caractéristiques géochimiques sont assez homogènes, avec une MO globalement d'origine marine plus oxygénée et moins hydrogénée que celle observée dans la partie supérieure. La confrontation IH/IO est assez classique et anti-corrélée. Les fractions de MO bien préservée présentent des IH élevés et des IO faibles, particulièrement observés dans la partie supérieure de la carotte. L'inverse est observé dans la partie inférieure. Malgré une oxygénation plus forte et un IH plus faible, la quantité de MO préservée reste importante (COT de 5%). Ces observations sont en accord avec les résultats

sédimentologiques et les données du niveau marin correspondant à la période étudiée. La MO des unités lithologiques de la partie inférieure s'est sédimentée sous un bas niveau marin avec une tranche d'eau plus ventilée et donc plus oxygénée. Les cellules d'*upwelling* pendant cette période étaient décalées vers le large. Ceci est confirmé par les températures les plus chaudes obtenues grâce à l'Uk'<sub>37</sub> des alcénones sur cette unité. Les palynofaciès globalement dominés par une MOA d'origine marine présentent dans cette unité inférieure une importante contribution (15 à 20% en moyenne) de MO d'origine terrestre. Cette MO d'origine terrestre est représentée pour l'essentiel par des cuticules et des membranes habituellement riches en composés hydrocarbonés, ce qui explique de ce fait un signal Rock-Eval de type II. La contribution terrestre de ligno-cellulosique plus oxydé et moins hydrogéné de type III est faible.

Les résultats obtenus à partir des n-alcanes de la fraction lipidique libre des sédiments de cette unité inférieure, montrent qu'à l'exception des chaînes n- alcanes pairs de C<sub>16</sub>-C<sub>23</sub>, les autres n-alcanes (longs pairs et impairs et courts impairs) présentent une distribution identique, liée probablement à une source commune. La dominance des longues chaînes plaide pour une source essentiellement continentale de ces lipides extractibles. La signature phytoplanctonique ne s'exprime pas dans cette fraction libre. En effet, les travaux réalisés par Boussafir et *al.* (2007) à partir d'échantillons plus récents (<500 ans) provenant d'un *box core* prélevé dans le même site montrent une dominance de la signature des n-alcanes d'origine phytoplanctonique révélée uniquement par couplage pyrolyse on-line CG/SM. La fraction libre présentait des résultats similaires à ceux résumés ici. Les n-alcanes courts pairs de concentration assez faible sont relativement plus présents à la base de cette unité. Cette fraction est probablement l'expression d'une MO produite uniquement pendant cette période plus favorable à des conditions oxydantes, à la faveur d'un contexte de bas niveau marin. Cette signature inhabituellement paire est interprétée par Nichimura & Baker (1986) et Grimalt & Albaigés (1987) comme étant d'origine bactérienne.

Sur la base des paramètres physiques, l'unité IV (3 060 – 2 700 ans cal BP) apparaît singulière comparée au reste de la carotte. Cette singularité est liée à des dépôts probablement détritiques événementiels remaniés coïncidant avec la surface

érosive mise en évidence lors de la description des images radioscopiques. Il s'agirait d'une sédimentation brusque de type tempestite ou seismite à l'origine de l'érosion/dépôt dans cette unité. Le contexte de marge active est favorable à ce type d'événements. Cette structure a un caractère régional, elle est documentée dans diverses études réalisées sur la marge péruvienne (Suess *et al.*, 1987 ; Rein *et al.*, 2004 et 2005 ; Skilbeck & Fink, 2006). Certains auteurs (Suess *et al.*, 1987) parlent d'une phase érosive résultant d'un renforcement du PUC associé à un réchauffement climatique global. D'autres auteurs (Rein, *et al.*, 2004 et 2005) expliquent cet événement comme une réduction brutale de la sédimentation, influencée par une baisse de la productivité et des apports plus faibles résultant de la migration de l'insolation vers l'hémisphère nord. Nos observations soulignent un événement érosif clair et restent en accord avec la première hypothèse de Suess et collaborateurs, probablement dans un cadre de baisse du taux de sédimentation. L'interprétation des paramètres pétrographiques et géochimiques de l'unité ne présente pas de signification en termes d'étude chronologique de l'archivage sédimentaire car il s'agit d'un sédiment non laminé déposé en un seul événement bref.

L'unité V (2700-860 ans cal BP) correspond à un retour à une sédimentation organique sous des conditions hydrodynamiques stables (laminations plus nettes). Les sédiments de cette unité se sont déposés sous un niveau marin plus proche de celui que l'on connaît actuellement. L'absence dans la littérature de courbes eustatiques holocènes pour la côte pacifique de l'Amérique du Sud (Pirazzoli, 1991 et ses références ; Luc Ortlieb, communication personnelle) ne permet pas de préciser les variations locales des niveaux marins. La sédimentation organique y est renforcée, vu les faibles valeurs de niveaux de gris et de densité. Comme le montrent les fortes teneurs en COT, la matrice minérale se trouve de ce fait en proportions moindres. Ceci est lié à une augmentation de la productivité organique. Les rapports C:N de cette unité, relativement élevés pour une zone de haute productivité primaire, peuvent être expliqués par les forts taux de dénitrification classiquement rencontrés au large des côtes péruviennes. Cette dénitrification est une des caractéristiques de la ZMO (Graco *et al.*, 2007).

Les résultats quantitatifs et qualitatifs de la MO exprimés par les indices Rock-Eval montrent des valeurs IH, IO et COT typiques d'une MO d'*upwelling*, c'est-à-dire une MO phytoplanctonique marine en abondance (productivité plus importante au cours de cette phase terminale de la carotte), et une qualité hydrogénée et faiblement oxygénée, preuve d'une meilleure préservation.

Les taux de sédimentation caractérisant cette partie de la carotte sont variables mais globalement plus forts comparés à ceux de la première moitié de la carotte, même s'ils tendent à diminuer vers le sommet. Ces résultats sont en accord avec les données récentes de Rein, *et al.* (2004 et 2005) et de Skilbeck & Fink (2006). La parfaite similitude, et l'abondance des chaînes longues de tous les profils des n-alcanes pour cette deuxième phase sédimentaire (figure V.2.11) indiquent certainement une source commune terrestre des extraits lipidiques de la MO. Les paramètres calculés à partir de leur distribution (CPI et ACL) montrent une amélioration des conditions de préservation et une certaine stabilité du système. Comme pour la première moitié de la carotte (13 000 – 9 000 ans cal BP)) la MO phytoplanctonique ne s'exprime pas dans la fraction lipidique libre. L'augmentation progressive de l'ACL<sub>(longs)</sub> indique une MO sédimentaire d'origine terrestre provenant probablement d'un milieu désertique, avec une baisse progressive de l'humidité sur le continent (source de ces alcanes). L'évolution au cours du temps des proportions du n-alcane en C<sub>33</sub> rapportée au total des n-alcanes longs impairs (figure V.2.14) montrent qu'une certaine cyclicité s'inscrit dans cette tendance à l'aridification décrite par l'ACL. Il s'agit probablement de l'influence cyclique de l'*upwelling* dans cette zone pour lequel une intensification s'accompagne classiquement d'une phase d'aridité sur le continent.

Les résultats palynologiques sont en accord avec les résultats géochimiques globaux et moléculaires. Ces résultats montrent une augmentation de l'activité de l'*upwelling* pour cette deuxième moitié de la carotte, comme le souligne l'augmentation des fréquences des globules amorphes orangés observées dans plusieurs zones d'*upwelling* actuels (Pichevin, 2004 ; Blanke, 2004). Ce renforcement de l'*upwelling* est également appuyé par des valeurs de températures (TSM) de deux degrés plus basses que celles de la première moitié de notre archive. Il est particulièrement intéressant de



souligner l'importante amplitude de la variabilité de la température enregistrée au cours de cette phase sédimentaire.

Un changement remarquable souligné par plusieurs marqueurs organiques est à noter entre environ 1800-2000 ans cal BP. Ce changement débute par une baisse des apports en végétaux supérieurs (n-alcanes faibles, diminution des Cuticules-Membranes du palynofaciès) suivi d'un retour à des apports fortement fluctuants. Ceci est probablement lié à un changement de régime des vents avec par moments, une baisse notable des apports organiques éoliens. On note également à partir de cette date une variabilité sédimentologique plus régulière et importante en amplitude associée à une augmentation épisodique de la part minérale pendant cette phase. Ce phénomène est également observé dans les résultats de température obtenus à partir de l'analyse de la distribution des alcénones. En effet, des fluctuations intenses, multiples et régulières, sont observées au départ de ce changement à 1800- 1500 ans cal BP, coïncident avec les variations de l'*el-Niño* observés par Moy *et al.* (2002) . Ces variations évoluent par la suite vers des fluctuations de faible fréquence traduisant des cyclicités de longue période (multiséculaire,  $\approx 400$  ans). Tous ces paramètres soulignent une intensification en amplitude de la cyclicité enregistrée pendant cette phase dans ce système, et témoignent d'un changement de mode et d'intensité dans les variations plutôt que d'un changement radical dans l'environnement sédimentaire.

#### ***V.4. Conclusions partielles***

Ce travail nous a permis d'étudier à haute résolution la sédimentation organique de la plateforme centrale péruvienne. Cette plateforme est sans doute la plus étudiée au monde. Cependant nos travaux se démarquent des différentes études, par (1) la fenêtre temporelle considérée : le Quaternaire supérieur plus particulièrement la période que se suit après le Drias Récent, (2) la haute résolution temporelle (1 échantillon tous les 5 ans environ pour la partie supérieure et tous les 15 ans pour la partie inférieure,) (3) par

l'approche multi-marqueurs organiques employée (de l'étude lithologique à la composition moléculaire).

Nos travaux ont permis d'affiner les informations climatiques et environnementales concernant les 13 000 dernières années avec une attention particulière sur les sédiments de l'Holocène supérieur (de 3 000 BP à l'Actuel).

L'une des caractéristiques principales de l'enregistrement sédimentaire de la carotte B13 est la teneur assez importante en matière organique des sédiments et l'homogénéité de cette matière organique en termes de sources. Cette MO est essentiellement d'origine marine à l'exception de la partie basale (12 400 à 9 000 ans cal BP) pour laquelle une influence continentale est remarquée, associée à des dépôts de bas niveaux marins.

D'un point de vue environnement de dépôt, nous avons pu mettre en évidence deux phases majeurs de sédimentation séparées par une lacune sédimentaire (de 9 040 - 3 060 ans cal BP) marquée par une surface érosive nette.

Une phase de bas niveau marin avec un enregistrement sédimentaire débutant à 12 400 ans cal BP et se terminant à environ 9 000 ans cal BP. Cette première moitié est caractérisée, en dépit de sa richesse en COT, par un fort apport minéral. L'environnement de dépôt est au départ de type côtier avec une MO de moins bonne qualité dont les paramètres qualitatifs dénotent une oxygénation de la colonne d'eau, des eaux plus chaudes et un hydrodynamisme plus intense. Nous avons pu montrer que cet environnement évolue grâce à un déplacement des cellules d'upwelling du large (pendant le bas niveau) vers le site de carottage (augmentation progressive du niveau marin) à partir de 11 200 ans cal BP.

Nous avons également pu expliquer grâce aux différents paramètres pétrographiques et géochimiques l'origine de l'anomalie des âges radiocarbone observée dans la deuxième moitié de la partie inférieure de cette carotte (entre 11 000 et 9 000 ans cal BP environ). Cette anomalie est liée à l'élévation du niveau marin et le dépôt des sédiments typiques d'upwelling permettant le recyclage de carbone plus ancien. Il s'agit d'un changement de l'effet réservoir des eaux utilisées par la

productivité primaire. L'installation de ces conditions s'est produite d'une manière rapide à la faveur d'une remontée assez brusque, post glaciaire, du niveau marin.

Nous avons pu montrer que la sédimentation post hiatus vers  $\approx 3\,000$  ans cal BP débute par une séquence assimilée à des dépôts turbiditiques. Cette séquence est surmontée par des sédiments dont la teneur en MO est plus importante et d'une qualité bien meilleure comparée à celle de la partie inférieure. Les sédiments de cette phase présentent des lamines franches et nettes, ce qui nous a permis de bien la distinguer de la partie ante hiatus, et ceci jusqu'à 860 ans cal BP. Les dépôts sont représentatifs d'un niveau marin plus haut et d'une tranche d'eau moins oxygénée : situation similaire à celle que l'on rencontre actuellement sur cette plateforme. Cette situation a débuté il y a 2 700 ans cal BP. Grâce aux différents marqueurs étudiés à haute résolution sur cette partie de la carotte, nous avons pu montrer que cette phase se caractérise par une expression importante des fluctuations de l'enregistrement sédimentaire probablement le résultat d'une variabilité climatique plus accentuée au cours de cette phase terminale. Cette dernière phase présente un changement bien marqué du mode de variabilité vers 2 000 ans cal BP.

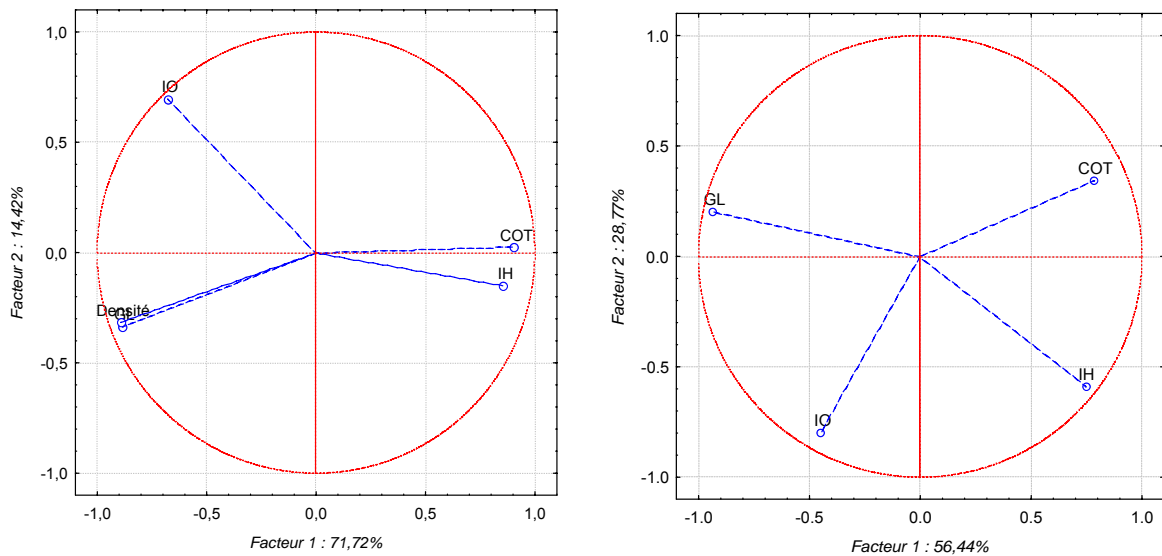
## **VI – Implications paléocéanographiques et paléoclimatiques**

Peu d'études portant sur l'Amérique du sud, et impliquant des mécanismes de téléconnections climatiques entre Pacifique et Atlantique, ont tenté d'expliquer le rôle des différents modes de variabilité du Pacifique et de l'Atlantique sud sur le climat du continent sud-américain durant le dernier Interglaciaire. Si les variations climatiques d'ordre interannuel, décennal et inter-décennal dans l'océan tropical ont été largement discutées durant les dernières années (Cobb *et al.*, 2003 ; Rein *et al.*, 2005 ; Gutierrez *et al.*, 2006 ; Vargas *et al.*, 2007), celles concernant les cycles séculaires sont moins bien connues. La question de la prédominance d'un forçage extra-tropical global ou de moyennes latitudes, dont les effets se propageraient vers les tropiques et les latitudes sud, se révèle d'un intérêt tout particulier concernant l'origine de ce type de variabilité climatique.

Pour mieux étayer les résultats et faciliter les interprétations paléocéanographiques et paléoclimatiques, nous avons choisi d'appliquer deux types d'analyses. Une analyse statistique en composantes principales de l'essentiel des données sédimentologiques et géochimiques, à haute résolution, issues de l'analyse des deux carottes B13 et CF02A (niveaux de gris, COT, IH, IO, densité), et une analyse d'ondelettes, destinée à mieux mettre en évidence les modes de variabilités qui modulent ces paramètres sédimentologiques.

Afin d'éclairer au mieux les mécanismes responsables des conditions climatiques et océanographiques durant le passé, nous avons choisi de comparer nos données avec d'autres enregistrements paléoclimatiques de la région. Nous avons donc comparé nos données avec 3 sites localisés dans la zone équatoriale des Amériques et avec un quatrième situé à proximité de la zone d'étude du Pacifique sud-est (figure V.1-2). Ces sites se répartissent sur deux transects, un latitudinal, pour une meilleure compréhension des variabilités à basses fréquences et leurs téléconnexions (Pacifique et Atlantique) ; et l'autre, longitudinal pour celles de hautes fréquences contrôlées par les mécanismes globaux et les forçages extratropicaux. Les sites auxquels sont comparées nos données sont le Bassin de Cariaco (Vénézuëla), la plateforme du Nordeste brésilien et le Pacifique équatorial est, et le site de prélèvement de la carotte SO147-106KL, localisé à proximité immédiate du site de prélèvement de la carotte B13 de notre étude.

L'analyse statistique en composantes principales, réalisée respectivement sur les données des carottes B13 et CF02A (figure VI-1), met en évidence une anti-corrélation entre deux groupes de données qui explique environ 60 % de la variance. Le premier regroupe la densité, le niveau de gris et l'indice d'oxygène, traduisant principalement les événements de transport des fractions terrigènes vers la plateforme par voie humide (fleuve), et les processus d'oxydation de la MO associés. Le deuxième, regroupant le COT et l'IH, traduit la production de la matière organique et sa préservation. Les hypothèses et conclusions issues de ces analyses sont présentées ci-dessous, d'abord pour le Dryas récent, puis pour l'Holocène moyen et pour l'Holocène supérieur.

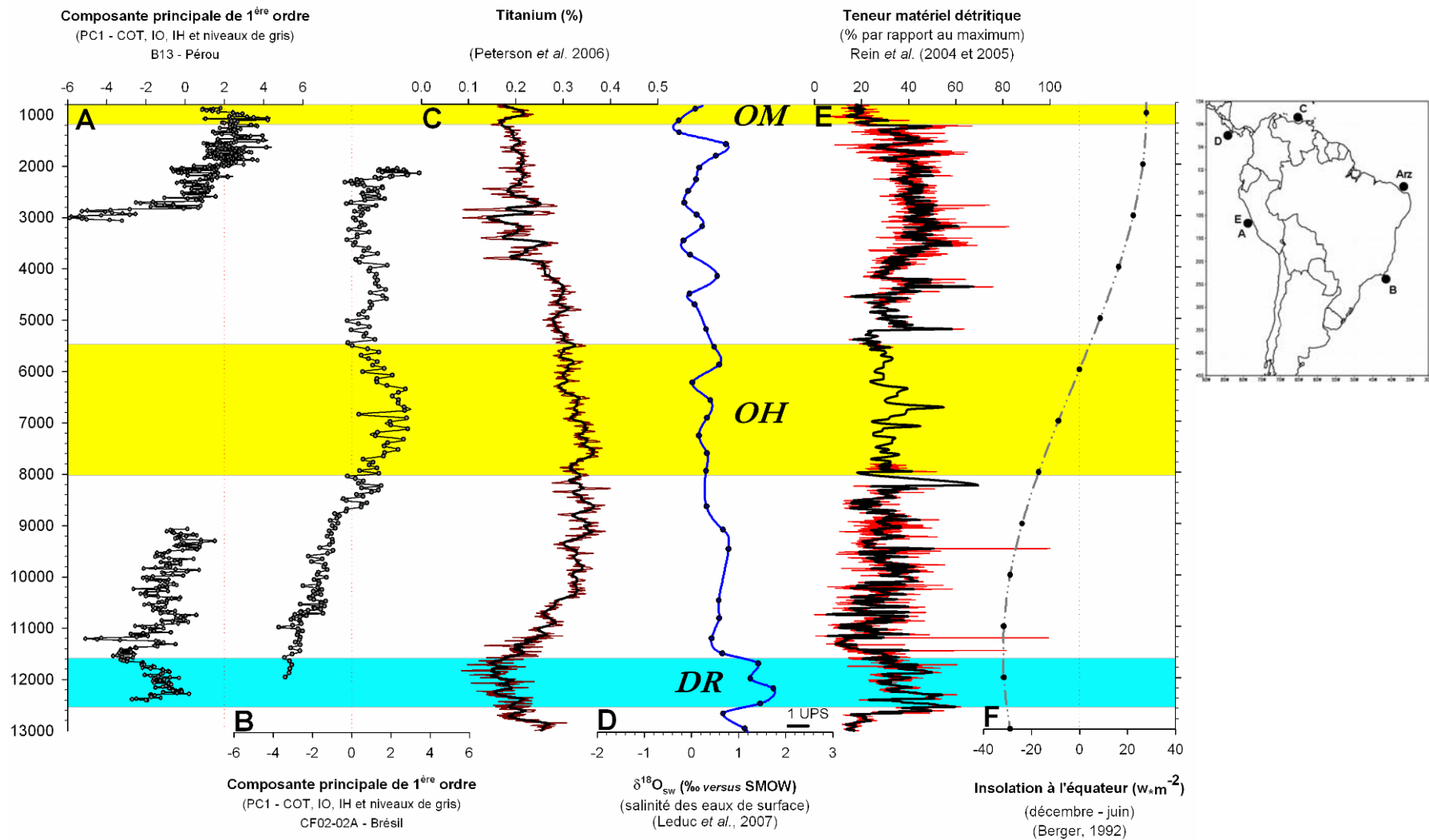


**Figure VI-1 :** Représentation graphique de l'analyse statistique en composantes principales des distributions des niveaux de gris (GL), du carbone organique total (COT), de l'indice d'oxygène (IO) et de l'indice d'hydrogène (IH) de la carotte B13 (à gauche) et de la carotte CF02A (à droite).

### *Le tardi-glaciaire*

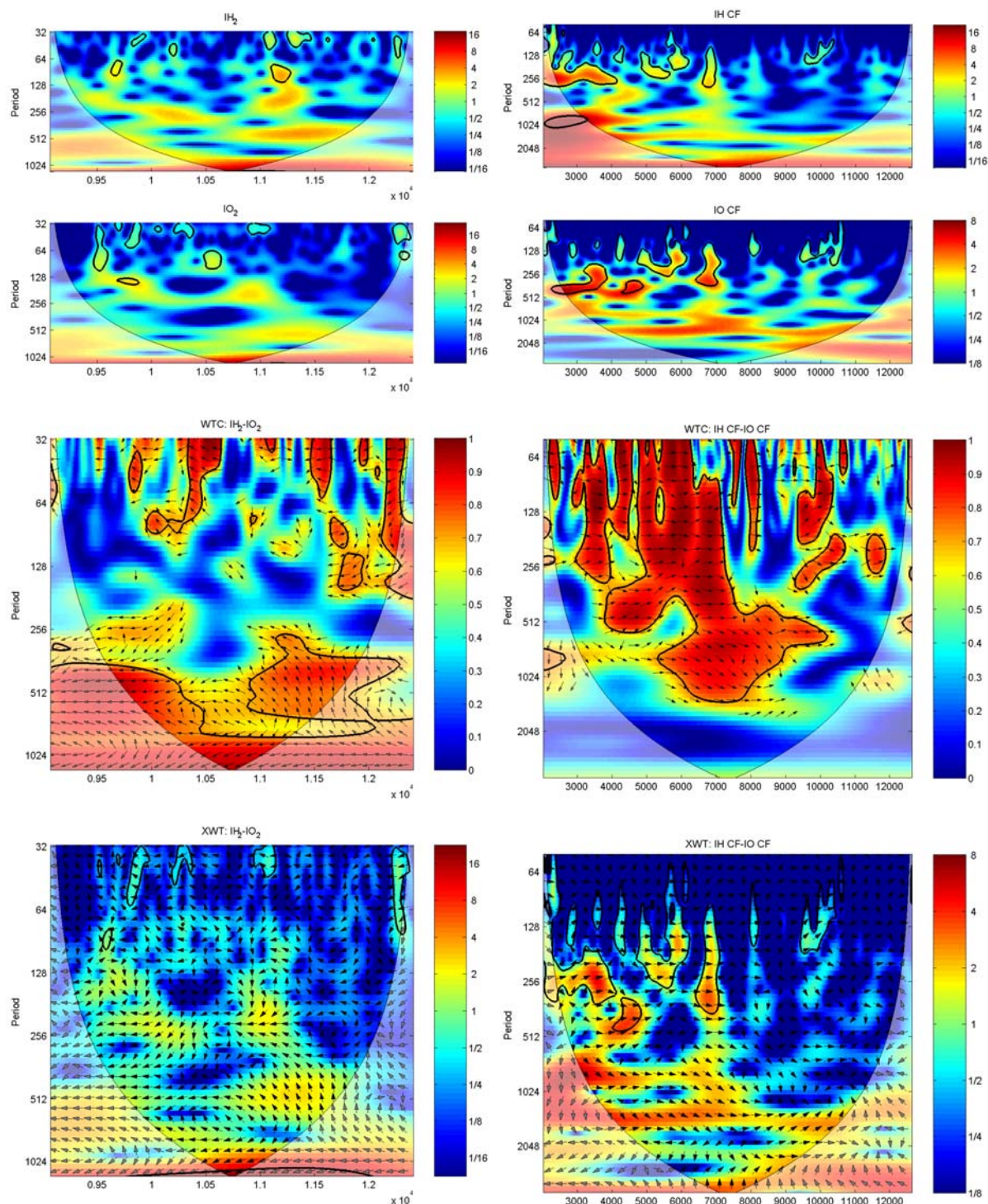
La déglaciation qui a suivi le dernier maximum glaciaire a été brutalement et spectaculairement interrompue il y a ~12 900 ans par un refroidissement étendu qui marque le début du Dryas récent (DR). Beaucoup de signes montrent que le DR a été marqué par des changements soudains dans la configuration de la calotte glaciaire, par l'assèchement brutal des lacs périglaciaires et par la réorganisation de la circulation thermohaline. Même si le niveau marin, durant cette époque, était en moyenne autour de 60 mètres plus bas que l'actuel, les caractéristiques sédimentologiques des deux carottes prélevées sur la plateforme centrale du Pérou et au Cabo frio mettent en évidence une réorganisation des conditions océanographiques de part et d'autre de l'Amérique du Sud, en réponse aux modifications des conditions climatiques.

Le maintien des valeurs négatives du facteur 1 (PC1), durant plus ou moins 1 300 ans de 12 700 à 11 400 ans cal BP, suggère une augmentation importante du transport détritique du continent vers l'océan par voie fluviale, associé à une augmentation de la dégradation par oxydation de la MO. En effet, le croisement des résultats de l'analyse « ondelettes » des indices de l'IO et de l'IH de la carotte B13 (Pérou), durant cette époque, montre de forts indices de représentativité des périodes allant du siècle aux périodes multi-décennales. Dans le même temps, le maintien de l'opposition de phases entre ces deux indices (Figure VI-3) traduit une intensification de l'oxydation de la matière organique par ventilation des masses d'eau côtières, conséquence de l'augmentation des concentrations de l'oxygène dissous dans la colonne d'eau, et donc de l'approfondissement de l'oxycline. Les reconstitutions des paléotempératures à partir des  $U^{k'}_{37}$  montre aussi des températures de superficie de la mer (TSM) plus élevées (1 à 2°C) par rapport à la moyenne. La combinaison de ces résultats suggère donc que, durant le Dryas récent, les conditions océaniques au large du Pérou étaient caractérisées par une diminution de la productivité, une diminution de l'intensité de la zone de minimum d'oxygène, une thermocline plus profonde, et enfin une intensification du transport détritique lié à des conditions plus humides sur le continent. Leduc *et al.* (2007), ont montré que cette période a été marquée par une augmentation de la salinité au niveau du Pacifique est tropical suite à une migration de la ZCIT vers le sud. Ces résultats sont aussi confirmés par Peterson *et al.* (2006) qui, par le biais d'une analyse de la variation du pourcentage de titane dans le bassin de Cariaco, ont montré une diminution du transport détritique, expliqué également par un déplacement de la ZCIT vers le sud. Un refroidissement de l'hémisphère nord provoquerait donc un déplacement de la ZCIT vers le sud, augmentant ainsi l'humidité aux basses latitudes et favorisant par là-même l'augmentation des débits fluviaux au niveau de la côte péruvienne. De plus, si l'on observe les conditions météorologiques actuelles, on constate qu'au cours des situations El Niño, le déplacement de la ZCIT vers le sud provoque une réorganisation de la circulation océanique du Pacifique, qui se traduit par un approfondissement de l'oxycline et de la thermocline.



**Figure VI-2 :** Comparaison des données paléoclimatiques et paléoenvironnementales obtenues dans ce travail et celles provenant d'autres sites clefs de l'Amérique du Sud. (OM = Optimum médieval ; OH = Optimum Holocène ; DR = Dryas récent)

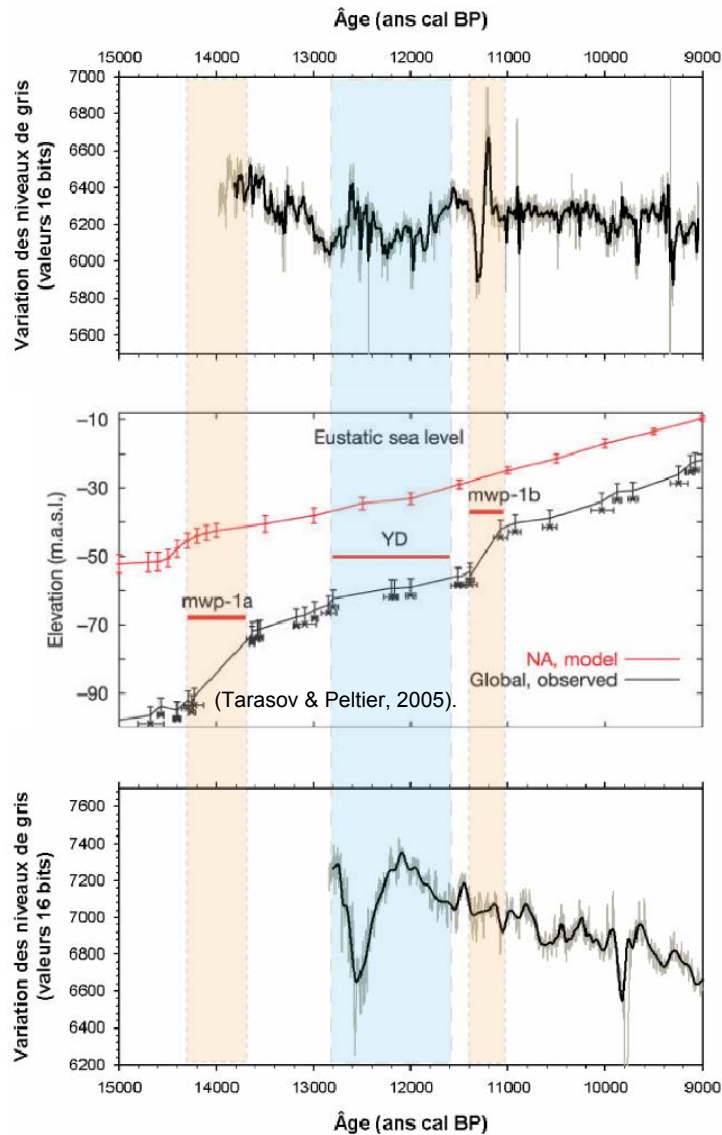




**Figure VI-3 :** Analyse par ondelettes des fréquences que modulent les variations de l'IO et de l'IH des carottes B13 (à gauche) et CF02A (à droite), pendant le tertiaire glaciaire et l'Holocène Moyen.

De l'autre côté du continent, le déplacement vers le sud de la ZCIT durant le Dryas récent, a certainement eu aussi un impact sur la variabilité climatique au niveau des côtes atlantiques. En effet, les données de *Arz et al.*, (1999), et *Leduc et al.*, (2007), montrent que le déplacement de la ZCIT s'est matérialisé par l'augmentation des débits des fleuves, et donc des précipitations, au niveau du *Nordeste* brésilien. Cette augmentation de l'humidité est étendue au reste du Brésil puisqu'elle a atteint la région sud-est, comme en attestent les résultats palynologiques de *Behling* (1998) montrant des conditions froides et humides dans cette dernière région. Cette augmentation de l'humidité a certainement favorisé l'activation des débits fluviaux du Rio Paraíba do Sul, qui transporte ainsi du matériel organique terrestre sur la plateforme. En outre, les données sismiques publiées par *Viana et al.*, (1998) et *Kowsmann et al.* (1979), montrent que l'embouchure de ce fleuve, à cette époque, était plus au sud et plus proche de la zone de collecte de la carotte. Les données des n-alcanes longs confirment une influence terrigène de la matière organique. Enfin, le résultat du croisement des ondelettes de la carotte CF02A montre que les périodicités de l'IO et l'IH sont significatives et cohérentes avec une évolution en phase, ce qui suggère également une origine terrestre de la MO.

La migration de la ZCIT provoquerait de plus une intensification des vents de NE responsables de la dérive du Courant du Brésil vers le large et de l'affleurement des eaux froides ECAS (Eau Centrale de l'Atlantique Sud), à l'origine de la productivité primaire. Comme, durant cette période, le niveau de la mer était 50 à 70 mètres plus bas que l'actuel, le centre des cellules de l'affleurement était situé plus au large, en dehors de la plateforme continentale et donc de la zone de collecte de la carotte. Compte tenu de ces caractéristiques morphologiques et océaniques, on ne peut pas décèler dans la carotte du Cabo Frio une augmentation de la productivité et donc l'installation des conditions d'*upwelling*.



**Figure VI-4 :** Comparaison des enregistrements sédimentaires du Cabo Frio (en bas) et de Callao (en haut) à l'évolution du niveau de la mer au Barbades durant le post-glaciaire.

### *L'Holocène moyen*

Après le Dryas récent, l'augmentation progressive de la composante principale de première ordre (PC1) jusqu'à 8 500 ans cal BP dans les deux carottes, atteste d'une productivité primaire croissante et de la bonne préservation de la matière organique sédimentaire. En effet, à partir de sa position plus australe, la ZCIT, en réponse aux forçages des hautes latitudes, migre vers sa position nord, comme en témoignent

l'augmentation du transport terrigène dans le bassin de Cariaco (Peterson *et al.*, 2006), et la diminution de la salinité au niveau du Pacifique est équatorial (Leduc *et al.*, 2007). En réponse à ce changement climatique, l'intensification de la productivité au niveau de la plateforme centrale du Pérou est certainement due à l'intensification des vents favorables à l'*upwelling*, favorisée par le renforcement de l'Anticyclone du Pacifique Sud. Il est clair que la tendance à l'augmentation de la productivité est contrainte par la vitesse de l'augmentation du niveau marin à la même époque, favorisant le rapprochement de la côte des cellules de l'*upwelling* de la zone de carottage et donc une augmentation lente de la productivité au cours du temps. Au niveau de la plateforme de Cabo Frio, cette migration vers le nord de la ZCIT se manifeste par le maintien d'une production primaire modérée favorisée par l'augmentation progressive du niveau marin, même si l'influence des vents de NE diminue. En effet, l'augmentation de 2°C des températures moyennes confirme la diminution de la fréquence de l'*upwelling* saisonnier de Cabo Frio. Cette migration de la ZCIT vers le nord est en outre certainement accompagnée par une migration simultanée de la zone d'influence de la ZCAS (Zone de Convergence de l'Atlantique Sud) vers le nord. En effet, la présence persistante de la ZCAS sur la région *Sudeste* brésilienne, se traduit par des pluviosités extrêmes (Carvalho *et al.*, 2002 et 2004), le lessivage du continent apportant alors à la plateforme continentale une charge détritique considérable. Si l'on se réfère à ces données instrumentales, on peut conclure qu'une migration de la ZCAS vers le nord provoque automatiquement moins de précipitations dans le bassin versant du Paraíba do Sul qui se jette à proximité du Cabo Frio (figure IV.1-13), comme en attestent les données palynologiques de Behling (1998). Une diminution des précipitations sur le bassin versant de ce fleuve s'accompagne alors d'une diminution du transport vers la plateforme.

Pour leur part, les résultats des ondelettes du Pacifique (carotte B13) des TOC, niveaux de gris (GL), IO et IH, montrent que la sédimentation organique y a été modulée par une périodicité de 32, 64 et 128 ans durant cette période. De plus, le croisement des ondelettes entre l'IH et l'IO montre qu'il existe une forte cohérence entre les périodicités mises en évidence par ces paramètres, et qu'elles sont qui plus est

caractérisées par des corrélations négatives, qui traduisent des conditions océaniques de fort recyclage de la MO sédimentaire favorisant l'oxydation de cette dernière par ventilation. Ces phénomènes de ventilation se manifestent actuellement par l'approfondissement de la thermocline et de l'oxycline, lors des événements interannuels (El Niño), décennaux (« *PDO* ») et séculaires par exemple. Ce fait suggère une intensification des conditions climatiques et océaniques de type El-Niño avec des durées plus longues, comme le confirment Rein *et al.* (2005) par l'analyse des ondelettes à partir des données de la fraction minérale de la carotte SO147-106KL, prélevée à proximité immédiate de la carotte B13 étudiée ici. Ces phénomènes de type El Niño, à travers des systèmes de téléconnections atmosphériques, sont à l'origine du stationnement de l'Anticyclone de l'Atlantique Sud (ASA) au niveau du *Nordeste* brésilien, et de la mise en place d'une zone de blocage au nord du Cabo Frio. Cette zone de blocage a certainement bloqué les vents de NE au nord du Cabo Frio, affaibli l'*upwelling* saisonnier et par conséquent diminué la productivité primaire.

La lacune sédimentaire dans la carotte B13, datée entre 9 000 et 3 000 ans cal BP, témoigne d'un événement érosif ou/et d'une diminution des taux de sédimentation. Les données publiées par Rein *et al.* (2005) pointent plutôt une diminution progressive des taux de sédimentation par diminution de l'apport terrigène. La baisse progressive de la sédimentation est en effet probablement due à moins de pluviosité sur le continent et donc à une ZCIT située en position boréale, comme en témoignent la diminution de la salinité dans le Pacifique (Leduc *et al.* 2007) et l'augmentation des apports détritiques dans le bassin de Cariaco (Peterson *et al.*, 2006 ; Haug *et al.*, 2001). Sous ce type de conditions climatiques, la position de la ZCIT plus au nord aurait dû entraîner un renforcement de l'anticyclone du Pacifique Sud, et donc des vents favorables à l'*upwelling* : elle aurait par conséquent dû être favorable à la productivité primaire, laquelle serait venue compenser la diminution de l'apport terrigène, et donc permettre le maintien d'un taux de sédimentation stable. Mais la position plus septentrionale de la ZCIT est en fait une conséquence d'un forçage astronomique avec des valeurs d'insolation maximales dans l'hémisphère nord et faibles dans l'hémisphère sud. Ces faibles valeurs d'insolation ont probablement

diminué l'écart de pression entre l'océan, qui a une inertie importante, et le continent, plus réactif au réchauffement. Ce faible écart de pression a donc dû affaiblir la tension des vents et par conséquent la productivité primaire, qui n'a pu compenser le manque d'apports terrigènes. Ceci nous permet de conclure que cette lacune sédimentaire, si elle n'est pas le résultat d'un phénomène érosif elle pourrait probablement être l'image d'une diminution des taux de sédimentation organo-minérale, et que les conditions hydrodynamiques ont probablement empêché une sédimentation plus continue même si elle est faible. De même que l'anticyclone Sud pacifique, celui de l'Atlantique se trouve affaibli, et par conséquent la zone de divergence des Alizés, actuellement située au niveau du Cape São Roque (État du Pernambuco, Brésil), se trouve plus au nord par rapport à aujourd'hui. Cette situation entraîne une diminution des vents atteignant la région de Cabo Frio et donc une persistance des eaux plus chaudes, confirmée par les données des Uk<sup>37</sup> qui montrent une augmentation de 4°C de la température, accompagnée d'un rapprochement de la côte du Courant du Brésil, moins riche en nutriments, ce qui signifie une diminution de la productivité.

L'augmentation rapide du PC1, portée par une augmentation des valeurs de COT et IH à partir de 7 500 ans Cal BP au niveau de Cabo Frio, est l'image d'un retour à des conditions climatiques et océanographiques favorables à une sédimentation caractérisée par une haute productivité et une bonne préservation de la MO sédimentaire. Cette période, connue sous le nom d'« Optimum Holocène (OH) », est marquée par la diminution des teneurs de titane dans le bassin de Cariaco, qui atteste ainsi d'un nouveau déplacement vers le sud de la ZCIT. Ce déplacement génère des conditions optimales pour le développement de l'*upwelling* du Cabo Frio. En effet, les données des Uk<sup>37</sup> montrent une diminution de 4°C des températures due à l'affleurement des eaux ECAS (Eaux Centrales de l'Atlantique Sud), du fait du déplacement de la couche superficielle chaude vers le large, rendu possible par le renforcement des vents de NE.

La diminution du PC1 à partir de 6 000 à 5 000 ans Cal BP, traduit une augmentation des valeurs de densité, c'est-à-dire du transport détritique, ce qui est confirmé par les données des n-alcanes longs. Ceci est probablement le signe d'une

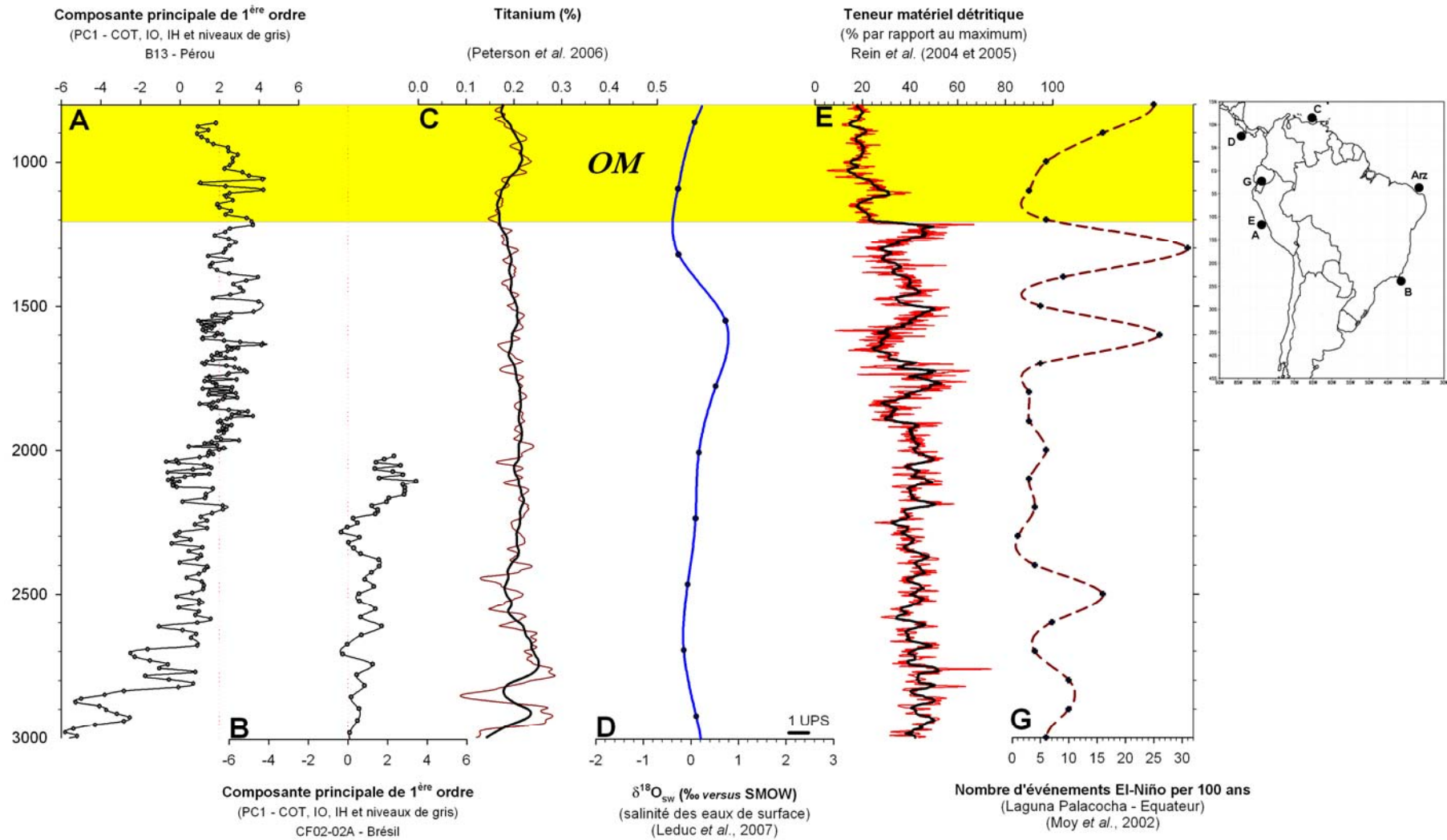
intensification de la ZCAS à l'occasion d'événements de type El Niño (Carvalho *et al.*, 2004). L'augmentation du transport humide (fluvial), à la même époque, au niveau de la côte Pacifique est (Rein *et al.*, 2005), et l'augmentation modérée de la salinité (0,5 psu), confirment cette hypothèse.

### ***L'Holocène supérieur***

La reprise de la sédimentation organique au niveau de la plateforme centrale du Pérou vers 3 000 ans cal BP, et jusqu'à 2 000 ans cal BP, a été initiée par des dépôts turbiditiques, suivis par des apports terrigènes conséquence d'une intensification d'événements El Niño (Rein *et al.*, 2005 ; Peterson *et al.*, 2006). Ainsi, les résultats des ondelettes à partir des indices IO et IH durant cette période, attestent d'une dominance de basse fréquence (16 ans) liée à l'expression d'une périodicité inter-décennale principalement de type PDO. Ce type de mode de variabilité a probablement favorisé la fréquence des blocages des fronts froids au niveau du Cabo Frio, ce qui explique les fortes valeurs de PC1 (augmentation du COT, IH).

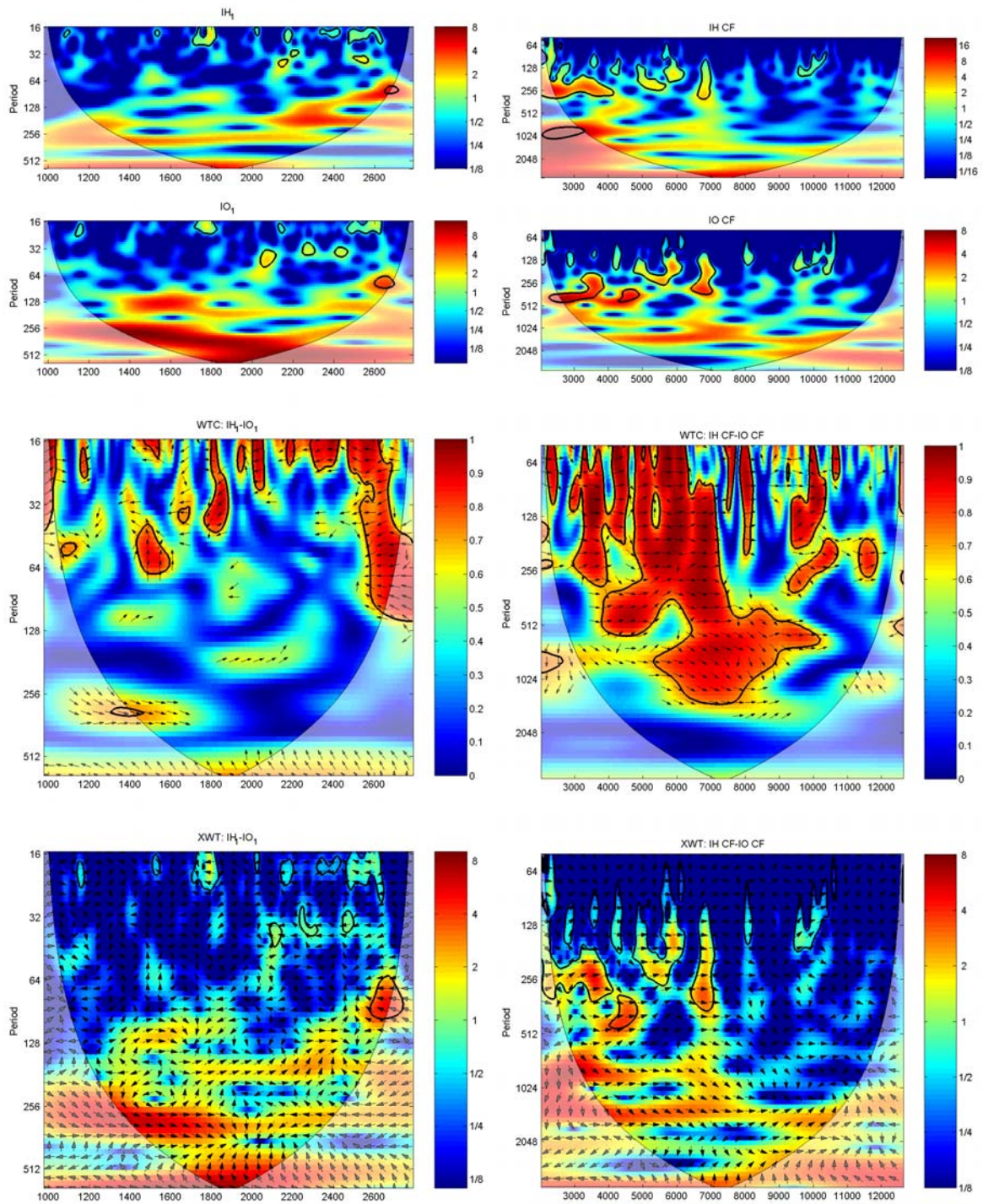
À partir de 2 000 ans cal BP, on note un changement des téléconnexions dans le Pacifique équatorial, caractérisé par une quasi-disparition des modes de variabilités interannuelles à décennales mises en évidence par l'analyse des ondelettes IO, IH. Ces résultats sont confirmés par les données de Moy *et al.* (2002), qui montrent à partir de cette époque une diminution de la fréquence des événements El Niño. De plus, les résultats de l'analyse statistique montrent, durant cette même époque, une forte variabilité du PC1 autour d'une valeur moyenne de 2, avec des périodes anormalement positives qui se maintiennent durant 200 ans et plus, comme la période de l'«Anomalie Climatique Médiévale » (ou Optimum Médiéval). En effet, cette période est caractérisée dans notre enregistrement par une augmentation de la productivité et de la préservation de la matière organique, accompagnée par une diminution puis un maintien de températures plus basses que la normale (2°C), témoin de conditions plus froides.





**Figure VI-5 :** Détail de la période récente de la Figure V-2 (page 220) - Comparaison entre les données paléoclimatiques et paléoenvironnementales obtenues dans ce travail et celles provenant d'autres sites clefs de l'Amérique du Sud.





**Figure VI-6 :** Analyse par ondelettes des fréquences que modulent les variations de l'IO et de l'IH des carottes B13 (à gauche) et CF02A (à droite), durant l'Holocène supérieur.

Ces conditions océaniques plus froides génèrent des conditions climatiques arides sur le continent, attestées par l'augmentation des n-alcanes longs notamment des n-alcanes (C33) indicateurs d'aridité. Celles-ci résultent probablement d'un maintien, durant 500 ans, de conditions semblables à celles provoquées par l'oscillation positive du phénomène ENSO La Niña. En effet, nos interprétations sont en parfait accord avec celles publiées par Graham *et al.* (2007), basées sur une sortie du modèle de circulation climatique globale (CGCM et AGCM<sup>19</sup>), qui a montré que durant cette époque les températures de surface du Pacifique équatorial étaient entre 0,5° à 2°C plus basses que l'actuel. Les données de Leduc *et al.* (2007) et Peterson *et al.*, (2006), sont cohérentes avec nos interprétations puisqu'elles montrent respectivement une diminution de la salinité au niveau du Pacifique équatoriale est, et une augmentation des apports détritiques au niveau du bassin de Cariaco, résultant d'une migration plus au nord de la ZCIT, et donc d'une intensification de la pluviosité. Au-delà, la tendance à la diminution du PC1 (diminution des valeurs de COT, de l'IH, augmentation des apports terrigène et des valeurs de l'IO), synchrone avec une diminution des apports détritiques au niveau du bassin de Cariaco et avec une tendance à l'augmentation de la salinité du Pacifique équatorial est, signe de l'entrée dans la période du Petit Âge Glaciaire (Little Ice Age), caractérisée par une migration de la ZCIT vers le sud comme cela est suggéré par Sifeddine *et al.*, sous presse.

---

<sup>19</sup> CGCM : Coupled ocean-atmosphere General Circulation Models  
AGCM : Atmospheric General Circulation Model



## VII – Conclusion générale

Cette étude est fondée sur la géochimie organique marine de deux environnements d'*upwelling* pélagique distincts de l'Amérique du Sud. L'un permanent, sur la côte ouest de l'Amérique du Sud (au large de Callao - Pérou), et l'autre saisonnier, sur la côte est (au large du Cabo Frio - Brésil). La matière organique sédimentaire a été utilisée comme outil pour retracer et étayer les connaissances sur l'évolution environnementale et climatique des marges tropicales de ce continent au cours du tardi-glaciaire et de l'Holocène. Ceci a été rendu possible grâce à une analyse à haute résolution des marqueurs organiques sédimentaires, globaux et spécifiques, tels que les teneurs totales en carbone organique et en azote, les indices d'oxygène et d'hydrogène, les palynofaciès et la composition moléculaire de la fraction lipidique extractible. Nous avons pu d'une part, mettre en évidence des processus et des mécanismes de transfert et d'accumulation organo-sédimentaire, et d'autre part, caractériser les environnements sédimentaires témoins, au cours de ces périodes, de mécanismes climatiques à diverses échelles (locale à globale) *via* les interactions océan-atmosphère-continent. Les analyses statistiques en composantes

principales et des ondelettes, basées sur la haute résolution, de certains paramètres sédimentologiques et organiques obtenus, nous ont permis d'appréhender les mécanismes majeurs du contrôle organo-sédimentaire, et de mettre en valeur des fréquences de variabilités climatiques peu étudiées, soit par méconnaissance de ces fréquences dans la zone climatique étudiée, soit par la difficulté d'obtenir des enregistrements sédimentaires appropriés.

Nous avons ainsi constaté un contrôle majeur des processus sédimentaires par l'évolution eustatique du niveau marin, durant le tardi-glaciaire et le début de l'Holocène moyen (13 000 à 9 000 ans cal BP), au niveau des deux plateformes continentales étudiées. Les carottes sédimentaires ont enregistré les conditions océanographiques découlant des variations dans la vitesse de remontée du niveau moyen de la mer durant cette période. Ces conditions de faibles tranches d'eau ne sont pas propices à un enregistrement clair et continu des variations environnementales d'*upwelling*, du fait soit de la haute énergie hydrodynamique qui règne habituellement et remanie le matériel, soit d'une réactivité importante à de faibles forçages, voire de leur vulnérabilité à des événements extrêmes qui viennent perturber profondément l'enregistrement.

Néanmoins, nos archives sédimentaires de cette époque nous ont permis également de déduire les conditions générales qui régnaient sur le milieu continental adjacent. En effet, de part et d'autre de l'Amérique du Sud, on note une augmentation des apports terrigènes associée à une humidité/pluviosité plus importante sur le continent. Ceci est dû à un positionnement plus austral de la zone de convergence inter tropicale (ZCIT), dont l'organisation des systèmes atmosphériques qui en découle se traduit par des conditions océanographiques favorables à l'*upwelling* (sauf pendant le Dryas récent). Les fréquences de variations climatiques décelées par les analyses des ondelettes sont majoritairement multi-décennales à séculaires.

Les bas niveaux marins, caractéristiques du postglaciaire, n'ont sans doute pas empêché la productivité organique des *upwellings*, mais ils ont probablement déplacé tout le système vers le large, et par voie de conséquence les zones de sédimentation organique. À travers l'analyse de l'évolution du contenu organique sédimentaire, nous avons ainsi constaté une migration des cellules d'*upwelling* en direction de la côte. Cet établissement progressif d'une lame d'eau de plus en plus importante, a certainement entraîné des conditions océaniques nouvelles sur les plateformes continentales, et plus particulièrement

sur la distribution des masses d'eau, qui possèdent chacune des caractéristiques physico-chimiques spécifiques associées à leur origine mais également à leur parcours.

Le contenu en CO<sub>2</sub> de ces masses d'eau, avec un carbone ayant un temps de résidence important pour la production organique, a dû certainement changer l'âge de cette matière organique sédimentaire. En effet, ces changements de l'effet réservoir, liés au déplacement des masses d'eau au cours du temps augmentent l'incertitude des datations radiocarbone. Ceci est particulièrement visible sur l'enregistrement de la plateforme centrale péruvienne (carotte B13), probablement du fait du fort contraste d'âge entre les eaux de surface (en équilibre avec l'atmosphère) et des eaux plus profondes (dont le temps de résidence et de parcours est très élevé). Au niveau du Cabo Frio cette différence est beaucoup moins exprimée.

L'Holocène moyen est marqué à ses débuts par l'augmentation de l'insolation dans l'hémisphère nord et une migration de la ZCIT vers le Nord, ce qui favorise le renforcement de l'*upwelling* au niveau de la côte centrale du Pérou. La côte *Sudeste* brésilienne, est alors sous influence marquée de la zone de convergence de l'Atlantique Sud (ZCAS), qui favorise une contribution continentale importante aux sédiments de cette plateforme. Les variations pluri-décennales et séculaires continuent de dominer les deux archives sédimentaires.

La période de l'Optimum Holocène ( $\approx 9\,000$  à  $\approx 6\,000$  ans cal BP), s'exprime dans le site atlantique (carotte CF02A) par des concentrations organiques plus fortes et stables, et donc des conditions océaniques et climatiques favorables à la dynamique de l'*upwelling* du sud-ouest atlantique. Cela signifie des alizés de NE forts et prédominants. À l'opposé, la plateforme centrale du Pérou subit pendant cette époque une réduction importante des taux de sédimentation, causée à la fois par l'affaiblissement de l'apport détritique continental et par celui de la productivité de l'*upwelling*. Une grande partie de la cause de ce fait doit être en relation avec les changements des conditions d'insolation. Ceci, dans la mesure où une diminution d'apport radiatif diminue le contraste thermique (et donc barométrique) océan-continent, ce qui réduit les intensités des vents, et limite à son tour l'efficience du pompage caractéristique de l'*upwelling*, et restreint donc la productivité et la sédimentation organiques. La fin de cette période, au Cabo Frio, est caractérisée par le regain du transport détritique, du fait du renforcement des courants côtiers de la portion de la plateforme continentale localisée au sud du Cabo Frio. Cela est

rendu possible par le stationnement persistant de la ZCAS sur la zone du Cabo Frio ou plus au nord. Du côté Pacifique, la fin de cet intervalle est marquée par des dépôts de caractère turbiditique.

La partie la plus récente de l'étude, l'Holocène supérieur (< 3 000 ans cal BP), est plus sensible aux événements pluriannuels. Les périodes où l'on dénombre moins d'événements du type El-Niño sont plus favorables à l'*upwelling* dans la région de Cabo Frio, comme la partie terminale de l'enregistrement (2 400 à 2 000 ans cal BP), à l'opposé de la période 3 800 – 2 800 ans cal BP où la forte fréquence de ces événements compromet la productivité. Ceci corrobore le lien existant entre la dynamique de la ZCAS et les conditions environnementales de l'océan Pacifique (Carvalho *et al.* 2002 et 2004), et cela y compris dans le passé. La côte Pacifique de l'Amérique du Sud (carotte B13) a enregistré la période de l'Optimum Médiéval (1 200 à 800 ans cal BP), comme une époque de forte productivité et d'excellente préservation sédimentaire de la matière organique. Pour que cela soit possible, un phénomène de type La-Niña (oscillation positive de l'ENSO), a dû s'exprimer majoritairement, de cette façon nous retrouvons l'*upwelling* très renforcé et persistant. Ces résultats valident une partie du modèle proposé par Graham *et al.* (2007).

## VIII - BIBLIOGRAPHIE

- Abbott, M.B., B.B. Wolfe, et al. (2003)** Holocene Paleohydrology and glacial history of the central Andes using multiproxy lake sediment studies. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 184: 123-138.
- Aldredge, A. (1998)** "The carbon, nitrogen and mass content of marine snow as a function of aggregate size". Deep-Sea Research part I, 45: 529-541.
- Angulo, R.J., M.C. de Souza, et al. (2005)** "Reservoir effect of the southern and southeastern Brazilian coast." Radiocarbon, 47(1): 67–73.
- Angulo, R.J., G.C. Lessa, et al. (2006)** "A critical review of mid- to late-Holocene sea-level fluctuations on the eastern Brazilian coastline". Quaternary Science Reviews 25: 486–506.
- Angulo, R.J., P.J. Reimer, et al. (2007)** "A tentative determination of upwelling influence on the paleo-surficial marine water reservoir effect in southeastern Brazil." Radiocarbon, 49(3): 1255-1259.
- Antoine D., J. M. Andre, et al. (1996)** "Oceanic primary production .2. Estimation at global scale from satellite (coastal zone color scanner) chlorophyll". Global Biogeochemical Cycles, 10: 57-69.
- Arz, H. W., J. Patzold, et al. (1999)** "The deglacial history of the western tropical Atlantic as inferred from high resolution stable isotope records off northeastern Brazil." Earth and Planetary Science Letters 167(1-2): 105-117.



- Assirieu, A.T., M.R. Stevenson , et al. (2003)** "Surface circulation and kinetic energy in the SW Atlantic obtained by drifters." Continental Shelf Research 23: 145–157.
- Bard, E., B. Hamelin, et al. (1996)** "Sea level record from Tahiti corals and the timing of deglacial meltwater discharge." Nature 382: 241-244.
- Baudin, F., N.-P. Tribouvillard, J. Trichet (2007)** "Géologie de la matière organique." Vuibert / Société Géologique de France. 1<sup>ère</sup> édition. 264p.
- Beers, J.R., M.R. Stevenson , et al. (1971)** Plankton Populations And Upwelling Off The Coast Of Peru, June 1969. Fisheries Bulletin, 69: 858-876.
- Behar, F., V. Beaumont, et al. (2001).** " Rock-Eval 6 Technology: Performances and Developments." Oil & Gas Science and Technology - Revue de l'Institut Français du Pétrole 56(2): 111-134.
- Behling, H. (1997)** "Late Quaternary vegetation, climate and fire history from the tropical mountain region of Morro de Itapeva, SE Brazil." Palaeogeograph, Palaeoclimatology, Palaeoecology 129: 407-422.
- Behling, H. (1998)** "Late Quaternary vegetational and climatic changes in Brazil." Review of Palaeobotany and Palynology 99: 143 156.
- Behling, H., H. W. Arz, et al. (2002).** "Late Quaternary vegetational and climate dynamics in southeastern Brazil, inferences from marine cores GeoB 3229-2 and GeoB 3202-1." Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 179(3-4): 227-243.
- Behling, H., L. Dupont, et al. (2007)** "Late Quaternary vegetation and climate dynamics in the Serra da Bocaina, southeastern Brazil." - Quaternary International 161: 22-31.
- Berger, A., M.F. Loutre (1991)** Insolation values for the climate of the last 10 million years. Quaternary Sciences Review, 10(4): 297-317.
- Berger, A. (1992)** Orbital Variations and Insolation Database. IGBP PAGES/World Data Center-A for Paleoclimatology Data Contribution Series # 92-007. NOAA/NGDC. Paleoclimatology Program, Boulder CO, USA
- Berger, W.H., V.S. Smetacek, et al. (1989)** "Ocean productivity and paleoproductivity : an overview." *In* « Productivity of the Ocean: Present and Past. » (Editeurs: Berger, W.H., Smetacek, V.S., et Wefer, G.). 429-455, J. Wiley and Sons, Chichester.
- Berger, W.H., G. Wefer (1996)** "Expeditions into the past: Paleoceanographic studies in the South Atlantic." *In* « The South Atlantic: Present and Past Circulation » (Editeurs: Wefer, G., Berger, W.H., Siedler, G., and Webb, D.J.). 363-410, Springer Verlag, Berlin.
- Berner, R.A. (1980)** "Early diagenesis: a theoretical approach." Princeton University Press, Princetown. 241p.
- Berner, R.A. & R. Raiswell (1983)** "Burial of organic carbon and pyrite sulphur in sediments of Phanerozoic time: A new theory." Geochimica et Cosmochimica Acta, 47; 855-862.
- Bertrand, P., & E. Lallier-Vergès (1993)** "Past sedimentary organic-matter accumulation and degradation controlled by productivity." Nature ,364: 786-788.

- Bertrand, P., E. Lallier-Vergès, et al. (1990)** "Examples of spatial relationships between organic matter and mineral groundmass in the microstructure of the organic-rich Dorset Formation rocks, Great Britain." Organic Geochemistry, 16: 661-675
- Bertrand, P., E. Lallier-Vergès, et al. (1994)** Enhancement of accumulation and anoxic degradation of organic-matter controlled by cyclic productivity - A model. Organic Geochemistry, 22: 511-520.
- Bertrand, P., T.F. Pedersen, et al. (2003)** "Organic-rich sediments in ventilated deep-sea environments: Relationship to climate, sea level, and trophic changes". Journal of Geophysical Research, 108: 1-11.
- Blanco, J.L., A.C. Thomas, et al. (2001)**. "Seasonal climatology of hydrographic conditions in the upwelling region off northern Chile". Journal of Geophysical Research (Oceans), 106(C6): 11451-11467.
- Boot, C. S., V. J. Ettwein, et al. (2006)**. "A 35,000 year record of terrigenous and marine lipids in Amazon Fan sediments." Organic Geochemistry 37(2): 208-219.
- Bourbonniere, R.A. & P. Meyers (1996)** "Sedimentary geolipid records of historical changes in the watersheds and productivities of Lakes Ontario and Erie." Limnology and Oceanography, 41(2): 352-359.
- Boussafir, M. & E. Lallier-Vergès (1997)** "Accumulation of organic matter in the Kimmeridge Clay Formation (KCF): an update fossilisation model for marine petroleum source-rocks." Marine and Petroleum Geology, 14: 75-83.
- Boussafir, M., F. Gelin, et al. (1995)** "Electron microscopy and pyrolysis of kerogens from the Kimmeridge Clay Formation, UK: source organisms, preservation processes, and origin of microcycles." Geochimica et Cosmochimica Acta, 59: 3731-3747.
- Boussafir, M., A. Sifeddine, et al. (2007)** "Apport de la géochimie et de la pétrographie organique dans l'étude des sédiments déposés au cours des cinq derniers siècles sur la plateforme péruvienne." 11<sup>ème</sup> Congrès de l'Association des Sédimentologues Français 2007, Caen.
- Braga, A.C. (2001)** Capítulo I – O Ambiente e a Biodiversidade. *In* Peixes Marinhos do Estado do Rio de Janeiro (Editeur: Bizerril, C.R.S.F & Costa, P.A.S.) Rio de Janeiro, FEMAR. 13-32.
- Brassell, S. C. (1993)**. Application of biomarkers for delineating marine paleoclimatic fluctuations during the Pleistocene. Organic geochemistry: principles and applications. M. H. Engel and S. A. Macko. New York, Plenum Press. 11: 699-738.
- Brassell, S. C., G. Eglinton, et al. (1986)**. "Molecular stratigraphy: a new tool for climatic assessment." Nature 320(6058): 129-133.
- Bray, E.E. & E.D. Evans (1961)** "Distribution of n-paraffins as a clue to recognition of source beds". Geochimica et Cosmochimica Acta, 22: 2-15.
- Calado L., A. Gangopadhyay, et al. (2006)** "A parametric model for the Brazil current meanders and eddies off southeastern Brazil." Geophysical Research Letters, 33: L12602.
- Calvert, S.E. (1987)**. Oceanographic controls on the accumulation of organic matter in marine sediments. Marine petroleum source rocks. J. Brooks and A. J. Fleet, Geological Society of London. Special Publication n° 26: 137-151.

- Calvert, S.E. & T.F. Pedersen, (1992)** "Organic carbon accumulation and preservation in marine sediments: how important is anoxia?" In « Productivity, Accumulation and Preservation of Organic Matter in Recent and Ancient Sediments » (Editeurs: Whelan J. K., and Farrington J. W.). 231–263. Columbia University Press.
- Campos, E. J. D., D. Velhote, et al. (2000).** "Shelf break upwelling driven by Brazil Current cyclonic meanders." Geophysical Research Letters 27(6): 751-754.
- Candfield, D.E. (1989)** Sulphate reduction and oxic respiration in marine sediments: implications for organic carbon preservation in euxinic environments. Deep-Sea Research, 36: 121-138.
- Canfield, D.E. (1993)** Organic matter oxidation in marine sediments. In "Interactions of C, N, P and S Biogeochemical Cycles and Global Changes", NATO series, Vol. 14 (Editeurs: Wollast, R., Mackenzie, F.T., Chou, L.), pp. 1-61. Springer, Berlin.
- Carvalho, C.E.V., M.S.M.B. Salomão, et al. (2002)** "Contribution of a medium-sized tropical river to the particulate heavy-metal load for the South Atlantic Ocean." The Science of the Total Environment, 284: 85-93.
- Carvalho, F.C. & E. Gonzalez-Rodrigues (2004)** "Development of primary and bacterial productivity in upwelling waters of Arraial do Cabo region, RJ (Brazil)." Brazilian journal of oceanography, 52(1):35-45.
- Carvalho, L.M.V., C. Jones, et al. (2002)** "Extreme precipitation events in southeastern South America and large-scale convective patterns in the South Atlantic Convergence Zone." Journal of climate, 15: 2377-2394.
- Carvalho, L.M.V., C. Jones, et al. (2004)** "The South Atlantic Convergence Zone: Intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall." Journal of climate, 17: 88-107.
- Carvalho, L.M.V., C. Jones, et al. (2005)** "Opposite phases of the antarctic oscillation and relationships with intraseasonal to interannual activity in the tropics during the austral summer." Journal of climate, 18: 702-718.
- Casarin, D.P. & V.E. Kousky (1986)** Anomalias de precipitação no Sul do Brasil e variações na circulação atmosférica. Revista Brasileira de Meteorologia, 2: 83-90.
- Castro, B.M.d. & L.B.d. Miranda, (1998).** Physical oceanography of the western atlantic continental shelf located between 4°N and 34°S. The Sea. A. R. Robinson and K. H. Brink. New York, John Wiley & Sons, Inc. 11: 209-251.
- Chavez, F.P. (1989)** Size distribution of phytoplankton in the central and eastern tropical Pacific. Global biogeochemical cycles, 3 (1): 27-35.
- Cobb, K.M., C.D. Charles, et al. (2003)** El Niño-Southern Oscillation and tropical Pacific climate during the last millennium. Nature 424: 271-276.
- Conte, M. H., A. Thompson, et al. (1998).** "Genetic and Physiological Influences on the Alkenone/Alkenoate Versus Growth Temperature Relationship in *Emiliana huxleyi* and *Gephyrocapsa Oceanica*." Geochimica et Cosmochimica Acta 62(1): 51-68.
- Copper, J.E & E.E. Bray (1963)** A postulated role of fatty acids in petroleum formation. Geochimica et Cosmochimica Actas, 27: 1113- 1127.

- Cordeiro, R.C., B. Turcq, et al. (2008)** Holocene fires in East Amazonia (Carajás), new evidences, chronology and relation with paleoclimate. Global and Planetary Change, 61: 49–62
- Corrêa, I. C. S. & J. A. Villwock (1996).** Continental shelf and coastal plain sediments of the southeast and south coast of Brazil. Atlas Morphology and sedimentology of the Southwest Atlantic Coastal Zone and the Continental Shelf from Cabo Frio (Brazil) to Península Valdés (Argentina): Explanatory text. L. R. Martins and I. C. S. Corrêa. Porto Alegre, RS - Brasil, UFRGS-IG-CECO: 41-54.
- Cranwell, P.A. (1973)** "Chain-length distribution of *n*-alkanes from lake sediments in relation to post-glacial environmental change." Fresh Water Biology, 3: 259-265.
- Cranwell, P.A. (1982)** Lipids of aquatic sediments and sedimenting particulates. Progress in Lipid Research, 21: 271–308.
- Dahl, B., J. Bojesen-Koefted, et al. (2004)** A new approach to interpreting Rock-Eval S2 and TOC data for kerogen quality assessment. Organic Geochemistry, 35 (11-12): 1461-1477.
- Delgado, C., R. Gomero, et al. (1987)** Sedimentos superficiales del margen continental peruano: un mapa textural. Bol. Inst. Mar Perú Callao, 11(5): 178-190.
- Delgado, C. & R. Gomero, (1988)** Textura, carbono orgánico y carbonatos de los sedimentos del margen continental peruano. *In* Recursos y Dinámica del Ecosistema de Afloramiento Peruano (Editores: Salzwedel y Landa). Boletín del Instituto del Mar del Perú, Vol. Extraordinario: 1-10.
- Delgado, C. & R. Gomero, (1995)** Atlas sedimentológico de la plataforma continental peruana. Inf. Inst. Mar Perú Callao, 110:1-31.
- Demaison, G. & G.T. Moore (1980)** Anoxic environments and oil source bed genesis. AAPG Bulletin-American Association of Petroleum Geologists 64: 1179-1209.
- Deschamps P., N. Durand, et al. (2008)** "Deglacial Melt Water Pulse 1A revisited from the new IODP Tahiti record." Geophysical Research Abstracts, 10, EGU2008-A-10905
- Dias, G., J.J.C. Palma, et al. (1982)** Matéria orgânica no quaternário da margem continental entre Rio de Janeiro e Guarapari. Projeto "Ressurgência", LAGEMAR IG / UFRJ – PETROBRAS, Relatório final. Rio de Janeiro, Brasil, 32p.
- Didyk, B.M., B.R.T. Simoneit, et al. (1978)** "Organic geochemical indicators of paleoenvironmental conditions of sedimentation." *Nature*, 272: 216-222
- Diniz, A. G., C. Hamacher, et al. (2003).** "Is Copper an Inhibiting Factor for Primary Production in the Upwelling Waters of Cabo Frio?" Journal of the Brazilian Chemical Society 14(5): 815-821.
- Disnar, J.R. & Ramanampisoa (1995)** "Palaeoproduction control on anoxia and organic matter preservation and accumulation in the Kimmeridge Clay Formation of Yorkshire (G.-B.): molecular assessment." *In* Organic Matter Accumulation, Lecture Notes in Earth Sciences (Editores: Lallier-Vergès E, Tribouillard N, Bertrand P.). 49-62. Springer.
- Duan, Y. (2000)** "Organic geochemistry of recent marine sediments from the Nansha Sea, China." Organic Geochemistry 31: 159–167.
- Engel, M.H. & S.A. Macko (1993)** "Organic geochemistry : principles and applications." Topics in geobiology; v. 11, Plenum Press, New York, 861p.

- Eppley, R.W. & B.J. Peterson (1979)** Particulate organic matter flux and planktonic new production in the deep-sea. Nature 282: 677-680.
- Epstein, B. L., S. D'Hondt, et al. (2001).** "The possible metabolic role of C37 alkenones in *Emiliania huxleyi*." Organic Geochemistry 32(6): 867-875.
- Espitalié, J., J.L. Laporte, et al. (1977)** Méthode rapide de caractérisation des roches mères, de leur potentiel pétrolier et de leur degré d'évolution. Revue de l'Institut Français du Pétrole 32: 23-42.
- Espitalié, J., G. Deroo, et al. (1985)** La pyrolyse Rock-Eval et ses applications; première partie. Revue de l'Institut Français du Pétrole 40: 563-579.
- Evangelista, H., D. Godiva, et al. (2007)** "Evidences linking ENSO and coral growth in the southwestern-south Atlantic." Climate Dynamics, 29:869–880
- Evans, D.L, S.S. Signorini, et al. (1983)** "A note on the transport of the Brazil Current." Journal of Physical Oceanography, 13: 1732-1738.
- Fairbanks, R.G. (1990)** The age and origin of the "Younger Dryas climate event" in Greenland ice cores, Paleoceanography, 5(6): 937-948.
- Fairbanks, R.G., C.D. Chales, et al. (1992)** "Origin of global meltwater pulses" *in*: Four Decades of Radiocarbon Studies, (Long and Kra, eds.) Springer, 473-500
- Fischer, G., V. Ratmeyer, et al. (2000)** "Organic carbon fluxes in the Atlantic and the Southern Ocean: relationship to primary production compiled from satellite radiometer data". Deep-Sea Research II, 47: 1961-1997
- Franchito, S. H., V. B. Rao, et al. (1998).** "The effect of coastal upwelling on the sea-breeze circulation at Cabo Frio, Brazil: a numerical experiment." Annales Geophysicae 16(7): 866-881.
- Ganeshram, R.S., S.E. Calvert, et al. (1999)** "Factors controlling the burial of organic carbon in laminated and bioturbated sediments off NW Mexico: implications for hydrocarbon preservation." Geochimica et Cosmochimica Acta 63, 1723-1734.
- Garret, A.E. (1991)** "Physical processes and the maintenance of nutrient-rich euphotic zones." Limnology and Oceanography, 36, 1527–1545
- Gong, C. & D.J. Hollander (1999)** "Evidence for differential degradation of alkenones under contrasting bottom water oxygen conditions: implication for paleotemperature reconstruction Geochimica et Cosmochimica Acta, 63: 405-411
- Gonzales-Rodriguez, E., J.-L. Valentin, et al. (1992).** "Upwelling and downwelling at Cabo Frio (Brazil): comparison of biomass and primary production responses." Journal of Plankton Research 14(2): 289-306.
- Graco, M.I., J. Ledesma, et al. (2007)** "Nutrientes, oxígeno y procesos biogeoquímicos en el sistema de surgencias de la corriente de Humboldt frente a Perú." Revista peruana de biología. 14(1): 117- 128
- Graham, N.E., M.K. Hugues (2007)** Tropical Pacific – mid-latitude teleconnections in medieval times. Climatic Change, 83:241–285

- Grimalt, J. & J. Albaigés (1987)** "Sources and occurrence of C12-C22 n-alkane distributions with and even carbon-number preference in sedimentary environments." Geochimica et Cosmochimica Acta, 51: 1379-1384.
- Gutierrez, D., A. Sifeddine, et al. (2006)** Anoxic sediments off Central Peru record interannual to multidecadal changes of climate and upwelling ecosystem during the last two centuries. Advances in Geosciences, 6: 119–125.
- Haarsma, R.J., E.J.D. Campos, et al. (2003)** "Atmospheric response to South Atlantic SST dipole." Geophysical Research Letters, 30(16): 1864
- Harada, N., M. Sato, et al. (2006).** "Characteristics of alkenone distributions in suspended and sinking particles in the northwestern North Pacific." Geochimica et Cosmochimica Acta 70(8): 2045-2062.
- Harris, C.K. & P.L. Wiberg, (2002)** "Across-shelf sediment transport: interactions between suspended sediment and bed sediment." Journal of Geophysical Research, 107(C1).
- Haug, G.H., K.A. Hughen, et al. (2001)** "Southward Migration of the Intertropical Convergence Zone Through the Holocene." Science, 293: 1304-1308.
- Hedges, J.I. & R.G. Keil, (1995)** Sedimentary organic matter preservation: an assessment and speculative synthesis. Marine Chemistry, 49 (2-3): 81-115.
- Heinrichs & Reeburg (1987)** Anaerobic mineralization of marine sediment organic matter: rates and the role of anaerobic processes in the oceanic carbon economy. Geomicrobiology 5: 191-237.
- Hendrikson, P., K.G. Sellner, et al. (1982)** The composition of particulate organic matter and biomass in the Peruvian upwelling region during ICANE 1977 (Nov. 14 - Dec. 2). Journal of Plankton Research, 4 (1): 163-186.
- Huang, Y., L. Dupont, et al. (2000)** "Mapping of C4 plant input from North West Africa into North East Atlantic sediments." Geochimica et Cosmochimica Acta, 64(20): 3505–3513.
- Huc, A. Y., P. Bertrand, et al. (2001).** "Organic sedimentation in deep offshore settings: the Quaternary sediments approach." Marine and Petroleum Geology 18(4): 513-517.
- Hughen, K.A., M.G.L. Baillie, et al.(2004)** "MARINE04 Marine radiocarbon age calibration, 0–26 cal kyr BP. " Radiocarbon, 46 (3): 1059–1086.
- Ingall, E.D., R.M. Bustin, et al. (1993)** "Influence of water column anoxia on the burial and preservation of carbon and phosphorus in marine shales." Geochimica et Cosmochimica Acta, 57(2): 303-316.
- Inthorn, M., T. Wagner, et al. (2006)** "Lateral transport controls distribution, quality, and burial of organic matter along continental slopes in high-productivity areas." Geology, 34(3): 205–208.
- Jansen, E., J. Overpeck, et al. (2007)** Palaeoclimate. *In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- Jeng, W.-L. (2006)** Higher plant n-alkane average chain length as an indicator of petrogenic hydrocarbon contamination in marine sediments. Marine Chemistry, 102 : 242–251.
- Jenny, B., B.L. Valero-Garcés, et al. (2002)** Early to Mid-Holocene Aridity in Central Chile And the Southern Westerlies: The laguna Aculeo record (34°S). Quaternary Research. 58: 160-170.
- Johns, R.J. (1986)** The instability of the tropical ecosystem in New Guinea. Blumea, 31 (2): 341-371.
- Katz, B.J. (1983)** Limitations of 'Rock-Eval' pyrolysis for typing organic matter. Organic Geochemistry, 4: 195-199
- Keefer, D.K., M.E. Moseley, et al. (2003)** A 38,000-year record of floods and debris flows in the Ilo region of Southern Peru and its relation to El Niño events and great earthquakes. Palaeogeography, Paleoclimatology, Paleoecology, 194: 41-77.
- Kennicutt, M.C., J.M. Barker, et al. (1987)** Selected organic matter source indicators in the Orinoco, Nile and Changjiang deltas. Organic Geochemistry, 11(1): 41-51.
- Kim, J.-H. & R.R. Schneider, (2003)** Low-latitude control of interhemispheric sea-surface temperature contrast in the tropical Atlantic over the past 21 kyears: the possible role of SE trade winds. Climate Dynamics, 21: 337–347
- Kousky, V.E. (1988)** Pentad outgoing longwave radiation climatology for the South America sector. Revista Brasileira de Meteorologia 3: 217-231.
- Kowsmann, R.O. & M.P.A. Costa, (1979).** Sedimentação quaternária da margem continental brasileira e das áreas oceânica adjacentes. Série Projeto REMAC, 8. PETROBRAS/CENPES/DINTEP. Rio de Janeiro. 55p.
- Kowsmann, R. O., M. A. Vicalvi, et al. (1979).** "Considerações sobre a sedimentação quaternária na Plataforma Continental Brasileira entre Cabo Frio e o Rio Itabapoana." Notícia Geomorfológica 19(37/38): 41-58.
- Lafargue, E., F. Marquis, et al. (1998).** "Rock-Eval 6 applications in hydrocarbon exploration, production, and soil contamination studies." Oil & Gas Science and Technology - Revue de l'Institut Français du Pétrole 53(4): 421-437.
- Lallier-Vergès, E. & P. Alberic (1990)** Optical and geochemical study of organic matter in present oxic sediments (equatorial North Pacific Ocean NIXO area). Oceanologica Acta, 10: 281– 291.
- Lallier-Vergès, E., P. Bertrand, et al. (1991)** Geochemical and optical investigations on degradation processes affecting organic matter in Celebes Basin sediments. In: Silver E., Rangin C., van Breyman M., (Eds.), Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, ODP, 124: 239-247.
- Lallier-Vergès, E., P. Bertrand, et al. (1993)** Organic matter composition and sulphate reduction intensity in Oman Margin sediments. Marine Geology, 112: 57-69.
- Lallier-Vergès, E., P. Bertrand, et al. (1995)** Short-term cyclicities from the Kimmeridge Clay Formation of Yorkshire (G.B.): combined accumulation and degradation of organic carbon under the control of primary production variations. In "Organic Matter Accumulation, Lecture Notes in Earth Sciences"(Editeurs: Lallier-Vergès, E. , Tribovillard, N., Bertrand, P.).4-11, Springer.

- Lallier-Vergès, E., P. Martinez, et al. (1998)** Sedimentation, reworking and preservation of organic matter in surficial sediments of the N-W African upwelling system. Mineral. Mag., 62A: 846-847.
- Laslandes, B. (2007).** Reconstitution de la variabilité climatique du littoral Fluminense (Rio de Janeiro – Brésil) au cours de l'Holocène par l'étude de bio-indicateurs (diatomées, coccolithophoridés). Thèse de Doctorat Université d'Angers. 253p.
- Laslandes, B., F. Sylvestre, et al. (2006)** Enregistrement de la variabilité hydroclimatique au cours des 6500 dernières années sur le littoral de Cabo Frio (Rio de Janeiro, Brésil). Comptes Rendus Geosciences 338: 667–675.
- Laubere, P., M. Richaud, et al. (2003)** Oceanic conditions in the eastern equatorial Pacific during the onset of ENSO in the Holocene. Quaternary Research, 60: 142-148.
- Ledru, M.-P. (1993).** "Late Quaternary Environmental and Climatic Changes in Central Brazil." Quaternary Research, 39(1): 90-98.
- Leduc, G., L. Vidal (2007)** Moisture transport across Central America as a positive feedback on abrupt climatic changes. Nature, 445: 908-911.
- Lee Thorp, J.A., K. Holmgren, et al. (2001)** Rapid climate shifts in the southern African interior throughout the mid to late Holocene. Geophysical Research Letters, 28: 4507-4510.
- Levin, L.A., A.E.R. Rathburn, et al. (2003)** Bioturbation by symbiont-bearing annelids in near-anoxic sediments: Implications for biofacies models and paleo-oxygen assessments. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 199: 120-140.
- Libes, S. (1992)** An introduction to marine biogeochemistry. John Wiley & Sons, Inc., New York: 289 p.
- Littke, R. & R.F. Sachsenhofer (1994)** Organic petrology of deep sea sediments: a compilation of results from the Ocean Drilling Program and the Deep Sea Drilling Project. Energy & Fuels, 8: 1498-1512.
- Lofi, J. & O. Weber (2001)** SCOPIX – Digital processing of X-ray images for the enhancement of sedimentary structures in core slabs. Geo-Marine Letters, 20: 182-186.
- Lückge, A., M. Boussafir, et al. (1999)** Comparative study of organic matter preservation in immature sediments along the continental margins of Peru and Oman. Part I: Results of petrographical and bulk geochemical data. Organic Geochemistry, 24(4): 437-451.
- Luedemann, E. F. & N. J. Rock (1971).** Studies with drift bottles in the region off Cabo Frio. Fertility of the Sea. J. D. Costlow. New York, Gordon and Breach Science Publishers. 1: 267-283.
- Mahiques, M. M. D., M. A. C. Bicego, et al. (2005).** "Modern sedimentation in the Cabo Frio upwelling system, Southeastern Brazilian shelf." Anais da Academia Brasileira de Ciências 77(3): 535-548.
- Mahiques, M. M. d., M. G. Tessler, et al. (2004).** "Hydrodynamically driven patterns of recent sedimentation in the shelf and upper slope off Southeast Brazil." Continental Shelf Research 24(15): 1685-1697.



- Mahiques, M.M., M.M. Fukumoto, et al. (2007)** Sedimentary changes on the Southeastern Brazilian upper slope during the last 35,000 years. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 79(1): 171-181.
- Marlowe, I.T., S.C. Brassell, et al. (1990)** Long-chain alkenones and alkyl alkenoates and the fossil coccolith record of marine sediments. Chemical Geology, 88: 349-375.
- Marlowe, I.T., S.C. Brassell, et al. (1984)** Long chain unsaturated ketones and esters in living algae and marine sediments. Organic Geochemistry, 6: 135-141
- Martin, L., J.-M. Flexor, et al. (1984)** Inversions du sens du Transport littoral enregistrées dans les cordons littoraux de la plaine côtière du Rio Doce (Brésil). Possible liaison avec des modifications de la circulation atmosphérique. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris - série II, 298 : 25-27
- Martin, L., J.-M. Flexor, et al. (1991)** Possible changes in the Holocene wind pattern recorded on Southeastern Brazilian coast. Boletim do Instituto de Geociências da USP, Publ. Esp. 8 : 117-131.
- Martin, L., J. M. L. Dominguez, et al. (2003).** "Fluctuating Holocene Sea Levels in Eastern and Southeastern Brazil: Evidence from Multiple Fossil and Geometric Indicators." Journal of Coastal Research 19(1): 101-124.
- Martin, L., J.-M. Flexor, et al. (1993).** Variacion de la dinamica costera durante los ultimos 5 000 años a lo largo de la costa brasileña como indicador de condiciones de tipo el niño. Taller internacional "el Cuaternario de Chile" / International workshop "the Quaternary of Chile", Santiago.
- Martin, L., J.-M. Flexor, et al. (1995).** Variacion de la dinamica costera durante los ultimos 5000 años a lo largo de la costa brasileña como indicador de condiciones de tipo el niño. Climas Cuaternarios en america del Sur / Quaternary Climate of South America. J. Argollo and P. Mourguiart. La Paz, Bolivia, ORSTOM: 95-109.
- Martin, L., J.-M. Flexor, et al. (1987).** The influence of "el-niño" phenomenon on the onset of Cabo Frio (Brazil) upwelling. On the possibility of recording past events. Cuaternario de America del Sur - Reunion Final, Ushuaia - Argentina, Centro Austral de Investigaciones Cientificas - CADIC.
- Martin, L., J.-M. Flexor, et al. (1988).** "Influence du phénomène océanique pacifique, "El Niño", sur l'"upwelling" et le climat de la region du Cabo Frio, sur la côte brésilienne de l'État de Rio de Janeiro." Comptes Rendus de l'Academie des Sciences - Série II 307: 1101-1105.
- Martin, L., M. Fournier, et al. (1993).** "Southern oscillation signal in south american palaeoclimatic data of the last 7000 years." Quaternary Research 39(3): 338-346.
- Martin, L., B. Turcq, et al. (1993).** Evolução da planície costeira entre Guaratiba e Cabo Frio (RJ). IV Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário - Paleoclimas e evolução Quaternária da América do Sul, São Paulo, Brasil.
- Martin, L. & K. Suguio (1992)** Variation of coastal dynamics during the last 7 000 years recorded in beach-ridge plains associated with river mouths : example from the central Brazilain coast. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 99: 119-140.

- Martinez P., P. Bertrand, et al. (2000)** Spatial variations in nutrient utilization, production and diagenesis in the sediments of a coastal upwelling regime (NW Africa): Implications for the paleoceanographic record". *Journal of Marine Research*. 58(5): 809-835, in press.
- Mascarenhas, A.S., L.B.d. Miranda, et al. (1971).** A study of the oceanographic conditions in the region of Cabo Frio. *Fertility of the Sea*. J. D. Costlow. New York, Gordon and Breach Science Publishers. 1: 285-308.
- McCave, I.N. (1984)** Size spectra and aggregation of suspended particles in the deep ocean. *Deep-Sea Research I*, 31: 329-352.
- Memery L., M. Arhan, et al. (2000)** The water masses along the western boundary of the south and equatorial Atlantic. *Progress in Oceanography*, 47: 69-98.
- Merle, J. (2006)** Océan et climat. IRD Editions. Paris. 222p.
- Mesquita, A.R. & J. Harari (2000)** On the sea level network and circulation in the southeastern Brazilian coast. *In IOC Workshop Report*, 171, Annex III- p. 34.
- Mesquita, A.R., J.B.A. Leite, et al. (1989)** Patterns of Instability in a Region of Shelf Break Upwelling. *Proc. SIUEC* ( 1982: Nov. 21 - 27 : Rio Grande, RS. Brazil). 2 : 425 - 436.
- Meyers, P.A. (1997).** "Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes." *Organic Geochemistry* 27(5-6): 213-250.
- Migeon, S., O. Weber, et al. (1999).** "SCOPIX: A new X-ray imaging system for core analysis." *Geo-Marine Letters* 18(3): 251-255.
- Miranda, L.B.d. (1985).** "Forma da correlação T-S de massas d'água das regiões costeiras e oceânica entre o Cabo de São Tomé (RJ) e a Ilha de São Sebastião (SP), Brasil." *Boletim do Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo* 33(2): 105-119.
- Mix, A.C., E. Bard, et al. (2000).** "Alkenones and multiproxy strategies in paleoceanographic studies." *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 1: 2000GC000056.
- Mollenhauer, G., T.I. Eglinton, et al. (2003).** "Asynchronous alkenone and foraminifera records from the Benguela Upwelling System." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 67(12): 2157-2171.
- Mollenhauer, G., R.R. Schneider, et al. (2004).** "Organic carbon accumulation in the South Atlantic Ocean: its modern, mid-Holocene and last glacial distribution." *Global and Planetary Change* 40(3-4): 249-266.
- Montecino, V., P.T. Strub, et al. (2005)** Bio-physical interactions off western South-America. *In: The Global Coastal Ocean: Interdisciplinary Regional Studies and Syntheses. The Sea*, vol 14. (Editeurs: Robinson, A. R., and K. H. Brink). Harvard University Press., Chapter 10.
- Montecinos, A. & O. Pizarro (2005)** Interdecadal sea surface temperature–sea level pressure coupled variability in the South Pacific Ocean. *Journal of Geophysical Research*, 110: C08005.
- Mook, W.G., & J. Van der Plicht (1999)** Reporting <sup>14</sup>C activities and concentrations. *Radiocarbon* 41(3):227–39.
- Moreira da Silva, P.deC. (1973)** A ressurgência em Cabo Frio. *Publicações do Instituto de Pesquisas da Marinha - IPqM*. 78: 1-56

- Mourguiart Ph., J.M.P. Argollo, et al. (1998)** Changements Limnologiques et Climatologiques Dans Le Bassin Du Lac Titicaca (Bolivie) Depuis 30 000 ans. Académie des Sciences. Paris, v.325: 139 – 146.
- Moy, C.M., G.O. Seltzer, et al. (2002).** Variability of El Niño/ Southern Oscillation activity at millennial timescales during the Holocene epoch. Nature, 420: 162-165.
- Muehe, D., E. Valentini (1998)** O Litoral do Rio de Janeiro: uma caracterização físico-ambiental. FEMAR. Rio de Janeiro. 123p.
- Müller, P. J., G. Kirst, et al. (1998).** "Calibration of the alkenone paleotemperature index  $U_{37}^{K'}$  based on core-tops from the eastern South Atlantic and the global ocean (60°N-60°S)." Geochimica et Cosmochimica Acta 62(10): 1757-1772.
- Müller, P.J., & E. Suess (1979)** Productivity, sedimentation rate and sedimentary organic matter in the oceans. I. Organic carbon preservation. Deep-Sea Research, 26: 1347-1362.
- Neves, M.H.C.B. (1988).** Étude des cyanophycées marines de la région de Cabo Frio (Rio de Janeiro, Brésil). Taxonomie et essay d'interprétation écologique. Paris, Thèse de doctorat Université Pierre et Marie Curie (PARIS VI): 154p.
- Newton, A., R. Thunell, et al. (2006)** Climate and hydrographic variability in the Indo-Pacific Warm Pool during the last millennium. Geophysical Research Letters, 33: L19710.
- Shi, N., R. Schneider, et al. (2001)** Southeast trade wind variations during the last 135 kyr: evidence from pollen spectra in eastern South Atlantic sediments. Earth and Planetary Science Letters, 187: 311-321.
- Nishimura, M. & E.W. Baker (1986)** Possible origin of *n*-alkanes with a remarkable even-to-odd predominance in recent marine sediments. Geochimica et Cosmochimica Acta, 50: 299-305
- Ohkouchi, N., K. Kawamura, et al. (1997).** "Molecular paleoclimatology: reconstruction of climate variabilities in the late Quaternary." Organic Geochemistry of Paleoclimatic Markers: Production, Preservation and Modeling 27(3-4): 173-183.
- Olson, D.B., Podesta, G.P., et al. (1988)** Temporal variations in the separation of Brazil and Malvinas currents. Deep-Sea Research, 35 (12): 1971-1990.
- Ordoñez, G.J.J. & A.H. Vera (2005)** Balance hídrico superficial del peru a nivel multianual. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología - SENAMHI, Lima - Perú, pp. 150.
- Ortlieb, L. & J. Macharé (1993)** Former El Niño events: records from western South America. Global and Planetary Change, 7: 181-202.
- Pellet, R. (1981)** Preservation and alteration of present-day sedimentary organic matter. Advances in Organic Geochemistry, 1981: 241-250
- Peltier , W.R. & R.G. Fairbanks (2006)** Global glacial ice volume and Last Glacial Maximum duration from an extended Barbados sea level record. Quaternary Science Reviews, 25: 3322-3337.
- Penha, H. (1999)** A synthesis of the geology of the east Fluminense coast, state of Rio de Janeiro, Brazil. In : Knoppers, .B., Bidone, E.D. & Abrão J.J. eds. Environmental Geochemistry of Coastal lagoons systems, Rio de Janeiro. Série Geoquímica Ambiental, 6: 3-10.

- Peter, K.E. & J.M. Moldowan (1993)** The biomarker guide : interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments / Kenneth E. Peters, J. Michael Moldowan. Englewood Cliffs, N.J. : Prentice Hall, 363p.
- Peterson, R.G. & L. Stramma (1990)** Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean. Progress in Oceanography, 26: 1-73.
- Peterson, L., & G.H. Haug (2006)** Variability in the mean latitude of the Atlantic Intertropical Convergence Zone as recorded by riverine input of sediments to the Cariaco Basin (Venezuela). Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 234: 97-113.
- Philp, R.P. (1985)** Fossil fuel biomarkers, Applications and spectra. Methods in geochemistry and geophysics, 23. Elsevier, Amsterdam.
- Pichevin, L. (2004)** Sédimentation organique profonde sur la marge continentale namibienne (Lüderitz, Atlantique Sud-Est) : impacts des variations climatiques sur la paléoprodutivité. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux I. 238p.
- Pirazzoli, P.A. (1991)** World atlas of Holocene sea-level changes. Elsevier Oceanography series, 58. Amsterdam. 300p.
- Podesta, G.P., O.B. Brown, et al. (1991)** The Annual Cycle of Satellite-derived Sea Surface Temperature in the Southwestern Atlantic Ocean. Journal of Climate, 4(4): 457-467.
- Poynter, J. & G. Eglinton (1990)** Molecular composition of three sediments from hole 717c: the bengal fan1. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 116: 155-161
- Poynter, J.G., P. Farrimond, et al. (1989)** Aeolian-derived higher plant lipids in the marine sedimental record: links with paleoclimate. *In*: Paleoclimatology and paleometeorology: modern and patterns of global atmospheric transport (Editeurs: Leinen M. & Sarinthein M.). Kluwer, Dordrecht, pp.435-462.
- Prahl, F.G. & S.G. Wakeham (1987)** Calibration of unsaturation patterns in long-chain ketone compositions for paleotemperature assessment. Nature, 330: 367-369.
- Prahl, F.G., L.A. Muehlhausen, et al. (1988)** Further evaluation of long-chain alkenones as indicators of paleoceanographic conditions. Geochimica et Cosmochimica Acta, 52: 2303-2310.
- Radach, G. (1980)** Preliminary simulations of the phytoplankton and phosphate dynamics during FLEX '76 with a simple two-component model. Meteorol. Forschungs-ergebnisse. (A. Aliq. Phys. Chem. Meeres), Berlin, 22 : 151-163
- REDEPETRO (2001)** Estudo de impacto ambiental da Bacia de Campos. Diagnóstico ambiental Integrado. REDEPETRO, Rio de Janeiro . CD-ROM
- REDEPETRO (2002)** Projeto de caracterização ambiental da bacia de Campos. Relatório parcial 4. Diagnóstico ambiental – parte 1. REDEPETRO, Rio de Janeiro. CD-ROM
- Rein, B., A. Lückge, et al. (2004)** A major Holocene ENSO anomaly during the Medieval period. Geophysical Research Letters, 31: L17211.
- Rein, B., A. Lückge, et al. (2005)** El Niño variability off Peru during the last 20,000 years. Paleoceanography, 20: PA4003.

- Rein, B. (2007)** How do the 1982/83 and 1997/98 El Niño's rank in a geological record from Peru?. Quaternary International, 161: 56-66.
- Robertson, A.W. & C.R. Mechoso (2000)** Interannual and Interdecadal Variability of the South Atlantic Convergence Zone. Monthly weather Review, 128: 2947-2957.
- Rocha, A.M.G.C., A.W. Gandu, et al. (1986)** A zona de convergência do atlântico sul. Departamento de Ciências Atmosféricas (DCA), Instituto Astronômico e Geofísico (IAG), Universidade de São Paulo (USP).
- Rodbell, D.T., G.O. Seltzer, et al. (1999)** An ~15,000 Year Record of El Niño-Driven Alluviation in Southwestern. Ecuador. Science, 283: 516-520.
- Rodrigues, R. R. & J. A. Lorenzzetti (2001).** "A numerical study of the effects of bottom topography and coastline geometry on the Southeast Brazilian coastal upwelling." Continental Shelf Research, 21(4): 371-394.
- Rodrigues, R.F. (1973)** Upwelling at Cabo Frio (Brazil). Master's thesis, Naval Postgraduate School Monterey California. 88p.
- Romankevich, E.A. (1984)**, Geochemistry of organic matter in the ocean. Springer-Verlag, Berlin. 334p.
- Rontani, J-F., P. Bonin, et al. (2005)** Degradation of alkenones and related compounds during oxic and anoxic incubation of the marine haptophyte *Emiliania huxleyi* with bacterial consortia isolated from microbial mats from the Camargue, France. Organic Geochemistry, 36: 603-618.
- Rontani, J-F., J.-C. Marty, et al. (2006 a)** Free radical oxidation (autoxidation) of alkenones and other microalgal lipids in seawater. Organic Geochemistry, 37: 354-368.
- Rontani, J-F., P. Bonin, et al. (2006 b)** Experimental and field evidence for thiyl radical-induced stereomutation of alkenones and other lipids in sediments and seawater . Organic Geochemistry, 37: 1489-1504.
- Rontani, J-F., R. Harji, et al. (2008)** Degradation of alkenones by aerobic heterotrophic bacteria: Selective or not? Organic Geochemistry, 39: 34-51.
- Rosell-Melé, A., G. Eglinton, et al. (1995)** Atlantic core-top calibration of the  $U_{37}^K$  index as a sea-surface palaeotemperature indicator. Geochimica et Cosmochimica Acta, 59 (15): 3099-3107.
- Roussell, J., M.R. Talbot, et al. (2003)** Mid-holocene climate change in Lake Bosumtwi, Ghana. Quaternary Research, 60: 133-141.
- Rutland, J. (1990)** Natural desertification mechanisms along the arid west coast of South America. Proc. International Workshop on Sand transport and Desertification in Arid Lands, Khartoum (Sudan): 235-253.
- Rutland, J., H. Fuenzalida, et al. (1998)** Interacción océano-atmósfera-tierra en la Región de Antofagasta (Chile, 23°S): Experimento DICLIMA. Revista Chilena de Historia Natural, 71:405-427.
- Rutland, J. (1997)** Variabilidad interanual del clima en la costa occidental árida de sudamerica: Consideraciones para un cambio climático global. Gestión de Sistemas Oceanográficos del Pacífico Oriental, :281-287.

- Saavedra, L., L.M.A. Dornelles, et al. (1999). Caracterização oceanográfica da plataforma continental interna adjacente ao Cabo Frio - RJ. No inverno de 1995. Ecologia dos ambientes costeiros do Estado do Rio de Janeiro. S. H. G. Silva and H. P. Lavrado. Rio de Janeiro, Brasil, PPGE-UFRJ. 7: 245-271.
- Sachs, J.P. & R.F. Anderson (2003). "Fidelity of alkenone paleotemperatures in southern Cape Basin sediment drifts." Paleocoenography 18(4): 1082.
- Sachs, J.P., R.R. Schneider, et al. (2000). "Alkenones as paleoceanographic proxies." Geochemistry, Geophysics, Geosystems 1.
- Sandweiss, D.H., K.A. Maasch, et al. (2001) Variation in Holocene El Niño frequencies: climate records and cultural consequences in ancient Peru. Geology, 29: 603-606.
- Saraceno, M., C. Provost, et al. (2004) Brazil Malvinas Frontal System as seen from 9 years of advanced very high resolution radiometer data. Journal of Geophysical Research, 109 (C5).
- Schefuß, E., V. Ratmeyer, et al. (2003) Carbon isotope analyses of n-alkanes in dust from the lower atmosphere over the central eastern Atlantic. Geochimica et Cosmochimica Acta, 67 (10): 1757–1767.
- Schefuß, E., G.J.M. Versteegh, et al. (2004). "Lipid biomarkers as major source and preservation indicators in SE Atlantic surface sediments." Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers 51(9): 1199-1228.
- Seiter, K., C. Hensen, et al. (2004). "Organic carbon content in surface sediments--defining regional provinces." Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers 51(12): 2001-2026.
- Sifeddine, A., L. Martin, et al. (2001) Variations of Amazonian Rain Forest environments: a sedimentological records covering 30,000 years BP. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 168: 221-235.
- Sifeddine, A., A.L.S. Albuquerque, et al. (2003). "A 21 000 cal years paleoclimatic record from Caçó Lake, northern Brazil: evidence from sedimentary and pollen analyses." Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 189: 25-34.
- Sifeddine, A., D. Wirmann, et al. (2004) Lacustrine Organic Matter sedimentation used for Palaeoenvironmental Reconstruction. Examples from the Tropical Belt of South America and Africa.. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 214: 41-53.
- Sifeddine, A., D. Gutiérrez, et al. (sous presse) Laminated sediments off the Central Peruvian Coast record changes in terrestrial runoff, upwelling productivity and redox conditions over recent centuries. Progresses in Oceanography.
- Sifeddine, A., P.A. Meyers, et al. (en preparation) Paleoclimate changes during the Holocene in Northern South America inferred by Sedimentological analyses.
- Sikes, E.L. & J.K. Volkman (1993) Calibration of alkenone unsaturation ratios  $U_{37}^{K'}$ s for paleotemperature estimation in cold polar waters. Geochimica et Cosmochimica Acta, 57: 1883-1889.
- Sikes, E., J.K. Volkman, et al. (1997) Alkenones and alkenes in surface waters and sediments of the Southern Ocean: Implications for paleotemperature estimation in polar regions. Geochimica et Cosmochimica Acta, 61 (7): 1495-1505.

- Silva, P.d.C.M.d. (1971).** Fertilization of the sea as a by-product of an industrial utilization of deep water. Fertility of the Sea. J. D. Costlow. New York, Gordon and Breach Science Publishers. 2: 463-467.
- Silva, P.d.C.M.d. (1971).** Upwelling and its biological effects in southern Brazil. Fertility of the Sea. J. D. Costlow. New York, Gordon and Breach Science Publishers. 2: 469-474.
- Simoneit, B.R.T., J.N. Cardoso, et al. (1991)** An assessment of terrestrial higher molecular weight lipid compounds in aerosol particulate matter over the South Atlantic from about 30– 70°S. Chemosphere, 23(4): 447–465.
- Sirocko, F. (2003)** What Drove Past Teleconnections? Science 301(5638): 1336-1337.
- Skilbeck, C.G. & D. Fink (2006)** 15. Data report: radiocarbon dating and sedimentation rates for holocene–upper pleistocene sediments, eastern equatorial pacific and peru continental margin. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results Volume 201: 15p.
- Stevenson, M.R., D. Dias-Brito, et al. (1998)** How do cold water biota arrive in a tropical bay near Rio de Janeiro, Brazil? Continental Shelf Research, 18: 1595-1612.
- Stramma, L. & R.G. Peterson (1990)** The South Atlantic Current. Journal of Physical Oceanography, 20: 846-859.
- Strub, P.T., J.M. Mesias, et al. (1998)** Coastal ocean circulation off western south America. Coastal segment (6,E). Chapter 10: 42p. *In*: The sea. (Editeurs: Allan R. Robinson é Kenneth H. Brink), 11.
- Strub, M., G. Hérail, et al. (2005)** Evidence of active tectonics during Holocene climate changes in the Subandean Zone of Bolivia. Geophysical Research Abstracts, 7: 10301.
- Stuiver, M. & P.J. Reimer (1993)** Modeling atmospheric <sup>14</sup>C influences and <sup>14</sup>C ages of marine samples to 10,000 BC. Radiocarbon, 35 (1): 137-189.
- Stuiver, M. & P.J. Reimer, et al. (2005)** CALIB 5 *in* <http://calib.qub.ac.uk/calib/manual/chapter4.html> (dernière actualisation le 02/08/2005)
- Suess, E. (1980)** Particulate organic carbon flux in the oceans—surface productivity and oxygen utilization. Nature, 288: 260-263.
- Suess, E., L.D. Kulm, et al. (1987)** Part II: Depositional and Environments. Coastal upwelling and a history of organic-rich mudstone deposition off Peru. Geological Society, London, Special Publications; 26: 181-197.
- Suess, E., R. Von Huene, et al. (1990)** Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 112: 738 p.
- Summerhayes, C.P, D. Kroon, et al. (1995)** Variability in the Benguela Current upwelling system over the past 70,000 years. Prog. Oceanog., 35: 207-251.
- Svedrup, H.U., M.W. Johnson, et al. (1946)** The Ocean. Their Physics, Chemistry, and General Biology. First edition New York: Prentice Hall, Inc., 1087p.
- Sylvestre, F., I. Martins Gil, et al. (2005)** Paleoclimatic variability from a hypersaline lagoon (Rio de Janeiro, Brazil) during the last 4500 years based on diatom studies. The Holocene, 15:625-30.

- Tarasov, L. & W.R. Peltier (2005)** Arctic freshwater forcing of the Younger Dryas cold reversal. 435: 662-665
- Tasayco-Ortega, L. A. (1996).** Variations paléohydrologiques et paléoclimatiques d'une région d'upwelling au cours de l'Holocène: enregistrement dans les lagunes côtières de Cabo Frio (Etat de Rio de Janeiro, Brésil). Laboratoire d'Océanographie Dynamique et de Climatologie - LODYC. Paris, Université Pierre et Marie Curie (PARIS VI): 321.
- ten Haven, H.L., J.W. de Leeuw, et al. (1987)** Restricted utility of the pristane/phytane ratio as a palaeoenvironmental indicator. Nature, 330: 641-643
- Ternois, Y., M.-A. Sicre, et al. (1998).** "Hydrocarbons, sterols and alkenones in sinking particles in the Indian Ocean sector of the Southern Ocean." Organic Geochemistry 28(7-8): 489-501.
- Thompson, L. G., M. E. Davis, et al. (1998).** "A 25,000-Year Tropical Climate History from Bolivian Ice Cores." Science 282(5395): 1858-1864.
- Tissot, B. & R. Pellet (1981)** Source and fate of organic matter in ocean sediments. Oceanologica Acta, 4 (sup): 97-103.
- Trenberth, K. (2001)** The Earth system: physical and chemical dimensions of global environmental change. 1: 13-30. *In* Encyclopedia of Global Environmental Change (Editeur Ted Munn).
- Trenberth, K. (2004)** The role of the ocean in climate. Ph.D., University Corporation for Atmospheric Research (UCAR) Boulder, Colorado. Chapter 1: 6p.
- Trenberth, K., J.T. Houghton, et al. (1996)** The climate system: An overview. Chapter 1 of Climate Change 1995. The science of Climate Change. Contribution of WG 1 to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (Editeurs: J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, B. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, and K. Maskell.) Cambridge University Press. 51-64.
- Turcq, B., A. Sifeddine, et al. (1998)** Amazonian Rainforest Fires: a lacustrine record of 7000 years. Ambio, 27 (2): 139-142.
- Turcq, B., L. Martin, et al. (1999)** Origin of the quaternary coastal plain between Guaratiba and Cabo Frio, State of Rio de Janeiro, Brazil. *In* : Knoppers, B., Bidone, E.D. & Abrão J.J. eds. Environmental Geochemistry of Coastal lagoons systems, Rio de Janeiro. Série Geoquímica Ambiental, 6: 24-45.
- Tyson, R. (1995)** Sedimentary organic matter: organic facies and palynofacies. Chapman, Hall, London.
- Valdés, J. R., A. Sifeddine, et al. (2004).** Petrographic and geochemical study of organic matter in surficial laminated sediments from an upwelling system (Mejillones del Sur Bay, Northern Chile). Organic Geochemistry 35(7): 881-894.
- Valentin, J.-L. (1984).** Analyse des paramètres hydrobiologiques dans la remontée de Cabo Frio (Brésil). Marine Biology 82: 259-276.
- Valentin, J.-L. (1984).** Spatial structure of the zooplankton community in the Cabo Frio region (Brazil) influenced by coastal upwelling. Hydrobiologia (Historical Archive) 113(1): 183-199.



- Valentin, J.-L. & W.M. Monteiro-Ribas (1993)** Zooplankton community structure on the east-southeast Brazilian continental shelf (18 23°S latitude). Continental Shelf Research, 13 (4): 407-424.
- Valentin, J. & A.P. Moreira (1978)** A matéria orgânica de origem zooplanctónica nas águas de ressurgência de Cabo Frio (Brasil). Anais Acad. bras. Ciênc. 50: 103-112.
- Vargas, G. (2002)** Interactions océan-atmosphère au cours des derniers siècles sur la côte du Désert d'Atacama : analyse multi-proxies des sédiments laminés de la baie de Mejillones (23°S). Ph.D. Thesis, Université Bordeaux I, 290 p.
- Vargas, G., S. Pantoja, et al. (2007)** Enhancement of coastal upwelling and interdecadal ENSO-like variability in the Peru-Chile Current since late 19th century. Geophysical Research Letters, 34: L13607.
- Velazco, F. & J.Y. Solís, (2000)** Estudio sedimentológico de la Bahía de Paracas. Inf. Prog. Ins. Mar. Perú. 133: 22p.
- Velazco, F. (1999)** Caracterización sedimentológica de la Bahía del Callao y la zona frente a Ventanilla (11°50'S-12°06'S y 77°08'W-77°14'W). VIII Congreso Latinoamericano de Ciencias del Mar (COLACMAR). Libro de Resúmenes Ampliados (2): 629-630.
- Viana, A.R., J.C. Faugères, et al. (1998)** Hydrology, morphology, and sedimentology of the Campos continental margin, offshore Brazil. Sedimentary Geology, 115: 133-157.
- Vilanueva, J., C. Plejero, et al. (1997)** Clean-up procedures for the unbiased estimation of C37 alkenone sea surface temperatures and terrigenous n-alkane inputs in paleoceanography. Journal of Chromatography A, 757: 145-151.
- Volkman, J.K., G. Eglinton, et al. (1980)** Long-chain alkenes and alkenones in the marine coccolithophorid *Emiliania Huxleyi*. Phytochemistry, 19: 2619-2622.
- Volkman, J.K., S.M. Barrett, et al. (1995)** Alkenones in *Gephyrocapsa oceanica*: Implications for studies of paleoclimate. Geochimica et Cosmochimica Acta, 59 (3): 513-520.
- Volkman, J.K., S.M. Barrett, et al. (1998)** Microalgal biomarkers: A review of recent research developments. Organic Geochemistry, 29 (5-7): 1163-1179.
- Von Huene, R., E. Suess, et al. (1986)** Ocean drilling program. Scientific prospectus n° 12. College Station, TX. (<http://www-dp.tamu.edu/publications/prosp/digital/112prosp.pdf>).
- Wainer, I. & S.A. Venegas (2002)** South Atlantic Multidecadal Variability in the Climate System Model. Journal of Climate, 15: 1408-1420.
- Wakeham, S.G., J.J. Hedges, et al. (1997)** Compositions and transport of lipid biomarkers through the water column and surficial sediments of the equatorial Pacific Ocean. Deep-Sea Research II, 44 (9-10): 2131-2162.
- Wyrthki, K. (1966)** Oceanography of the eastern equatorial Pacific Ocean. Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev. 4: 33-68.
- Yalçın Erik, N., O. Özcelik, et al. (2006)** Interpreting Rock–Eval pyrolysis data using graphs of S2 vs. TOC: Middle Triassic–Lower Jurassic units, eastern part of SE Turkey. Journal of Petroleum Science and Engineering, 53: 34-46.

## VIII - Bibliographie

**Zuta, S. & Gruillén (1970)** Oceanografía de las aguas del Peru. Boletín Instituto del Mar de Peru, 2: 41-62.

**Zuta, S., T. Rivera, et al. (1978)** Hydrologic aspects of the main upwelling areas off Peru. *In* : Boje, R., Tomczak, M. (Eds.), Upwelling Ecosystems. Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York: 235-257.



## IX - Liste des figures

<b>Figure I-1</b> : Les deux régions d'étude, soumises à des influences climatiques différentes.	19
<b>Figure II -1</b> : Localisation des séries de données atteignant (a) 1000 AD et (c) 1750 AD, utilisées par le GIEC pour reconstituer les températures des hémisphères nord et sud (Jansen <i>et al.</i> , 2007).	26
<b>Figure II-2</b> : Schéma du bilan énergétique annuel de la planète, et de la circulation atmosphérique primaire qui en découle (Trenberth, 2001).	27
<b>Figure II-3</b> : Quelques exemples de variabilités climatiques décennales : El-Niño / oscillation sud (ENOS), oscillation décennale du Pacifique (ODP), oscillation nord Atlantique (ONA), variabilité de l'Atlantique tropical (VAT), dipôle de l'Atlantique sud (DAS) et les oscillations polaires arctique (OA) et antarctique (OAA).	29
<b>Figure II-4</b> : Exemples de sites d'études paléoclimatiques dans l'Amérique du Sud : 1 – Lac Titicaca, 2 – Glacier du Sajama, 3 – Carajas, 4 – Rio Doce, 5 – Cabo Frio, 6 – Bassin de Cariaco, et 7 – Lac Palacocha. AMA – Amazonie, NEB – Nordeste brésilien, SEB – Sudeste brésilien, ZCIT – zone de convergence intertropicale, ZCAS – zone de convergence de l'Atlantique sud.	32

<b>Figure II-5 :</b> (A) La spirale d'Ekman est la représentation d'un courant généré par le vent en eaux profondes, et montre la réduction de l'intensité et le changement de direction à des intervalles réguliers de profondeur. (B) Schéma de l'effet du vent sur la production d'un courant parallèle à la côte dans l'hémisphère nord. En haut, une condition de « <i>downwelling</i> » proche de la côte, et en bas une condition d'« <i>upwelling</i> » (Sverdrup, 1946).	36
<b>Figure II-6 :</b> Productivité moyenne annuelle nette terrestre et océanique durant l'année 2002 à la surface du globe ( $\text{kg C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$ ).	38
<b>Figure II-7 :</b> Teneurs en carbone organique total dans la couche superficielle des sédiments marins (< 5 cm) (Seiter <i>et al.</i> , 2004).	42
<b>Figure III-1:</b> Schéma de la chaîne d'acquisition de l'analyseur SCOPIX (d'après Migeon <i>et al.</i> , 1999).	47
<b>Figure II-2 :</b> Exemple de détermination de l'âge cal BP sur un échantillon présentant une distribution complexe de la probabilité de l'âge calibré. Probabilités calculées par rapport à la courbe de calibration marine.	51
<b>Figure III-3 :</b> Principe de fonctionnement de l'analyseur élémentaire « Elementar - Vario El III ».	55
<b>Figure III-4 :</b> Principes de mesure et de calcul des paramètres de l'analyseur Rock-Eval 6®	59
<b>Figure III-5 :</b> Typologie de la matière organique sédimentaire d'après les paramètres Rock-Eval	61
<b>Figure III-6 :</b> Quelques coccolithophoridés : <b>A</b> et <b>B</b> - <i>Emiliania huxleyi</i> ; <b>C</b> - <i>Gephyrocapsa oceanica</i> ; <b>D</b> - <i>Coccolithus pelagicus</i> ; <b>E</b> - <i>Florisphaera profunda</i> .	68
<b>Figure III-7 :</b> Les structures chimiques des divers alcénones à 37 carbones.	69
<b>Figure III-8 :</b> Schéma méthodologique de l'étude.	74
<b>Figure IV.1-1 :</b> Image satellitale de l'État de Rio de Janeiro (Brésil).	78
<b>Figure IV.1-2 :</b> Localisation de la zone d'étude. D'après Castro & Miranda (1998) et Lorenzetti (2001).	79
<b>Figure IV.1-3 :</b> Représentation schématique de la circulation océanique de surface dans l'Océan Atlantique Sud (Peterson & Stramma, 1991).	81
<b>Figure IV.1-4:</b> Distribution schématique des courants superficiels de l'enfoncement sud-brésilien. (Mesquita, 2000).	82
<b>Figure IV.3-5 :</b> <b>A</b> – Distribution verticale des masses d'eau au large du Cabo Frio. Adapté de (REDEPETRO, 2000) et (Castro, 1998). <b>B</b> – Schéma du mécanisme de remontée des eaux profondes au large du Cabo Frio. Adapté de Mesquita (2002) et Braga (2001).	83

- Figure IV.1-6 :** **A** – L’anticyclone subtropical de l’Atlantique Sud (ASA), responsable des vents N et NE (signe de beau temps) ;  
**B** – Un système frontal sur le bassin de Campos (orages) ;  
**C** – l’anticyclone polaire (AP), responsable des vents de S et SW (chute de température et augmentation des précipitations). 87
- Figure IV.1-7:** Variation quotidienne du vent sur la côte du Cabo Frio (22°59’S, 42°02’W). Les données correspondent à une situation préfrontale pendant la période du 16 au 22 janvier 1986. (Franchito *et al.*, 1998) 87
- Figure IV.1-8 :** **A** - Distribution moyenne des directions et des intensités des vents, au cours des années 1987 à 1996, d’après Violante - Carvalho (1997) *in* REDEPETRO, (2001) ;  
**B** - pendant la période d’été austral ; 1960 à 1999, et  
**C** - durant les mois d’hiver austral, dans le bassin de Campos; de 1960 à 1999. 89
- Figure IV.1-9 :** **A** – Image satellite montrant la bande convective nuageuse caractéristique de la ZCAS  
(Source : [http://www.icesb.ucsb.edu/gem/ZCAS\\_leila\\_explanation.ppt](http://www.icesb.ucsb.edu/gem/ZCAS_leila_explanation.ppt)) ;  
**B** – Précipitation journalière moyenne (1° lat-long) sur le Brésil et le régime de vents de basse altitude (850hPa) à partir de réanalyses sur l’Amérique du Sud pour la période de décembre à février.  
Le pointillé représente l’orographie, premier contour et intervalle égal à 500m ; SP – São Paulo ; MG – Minas Gerais ; RJ – Rio de Janeiro (Carvalho *et al.*, 2002) ;  
**C** – Variabilité espace temporelle de la activité convective estivale sur l’Amérique du Sud (décembre à février) entre 1979-1996, à partir de l’analyse de radiation de ondes longues OLR (« Outgoing Longwave Radiation ») (Carvalho *et al.*, 2002) 91
- Figure IV.1-10 :** L’oscillation antarctique. 93
- Figure IV.1-11 :** Les dipôles de températures de surface de l’Océan Atlantique tropical, caractéristiques de la variabilité Atlantique tropicale (TAV). 94
- Figure IV.1-12 :** La distribution des températures de surface de l’Océan Atlantique, caractéristiques de l’oscillation multi-décennale de l’Atlantique (AMO). 95
- Figure IV.1-13 :** Bassin-versant du Paraíba do Sul, d’après ANA (2004). 96
- Figure IV.1-14 :** Débit du fleuve Paraíba do Sul, à gauche pour la période 1934-1978 (Carvalho, 2002) et à droite pour la période 1989-1996 (Muehe, 1998) 96
- Figure IV.1-15 :** Paléo ligne de rivage datant d’environ 13 000 ans BP, au large du Cabo Frio. Présenté par Kowsmann *et al.* (1979). 97
- Figure IV.1-16 :** Carte de distribution des sédiments superficiels de la plateforme continentale entre le *Rio Doce* et la *Região dos Lagos* (région des lagunes côtières), d’après Dias *et al.* (1982). 98

<b>Figure IV.1-17 :</b> Minéralogie des argiles de la couverture sédimentaire superficielle de la plateforme continentale SE Brésilienne, selon Kowsmann <i>et al.</i> (1979).	99
<b>Figure IV.2-1 :</b> <b>A</b> – Position de la carotte CF02-02A par rapport à la distribution des faciès sédimentaires superficiels de la plateforme continentale de la région comprise entre le Cabo Frio et le Cabo de São Tomé. <b>B</b> – Le carottier utilisé lors de campagne en mer.	102
<b>Figure IV.2-2 :</b> Images radioscopiques (SCOPIX), photos et images radioscopiques traitées, des sections de la carotte CF02-02A.	104
<b>Figure IV.2-3 :</b> Lithologie, niveaux de gris (SCOPIX) et densité de la carotte CF02-02A	106
<b>Figure IV.2-4 :</b> Chronologie, taux de sédimentations et résolution temporelle de l'échantillonnage de la carotte CF02-02A.	108
<b>Figure IV.2-5 :</b> Teneurs élémentaires de carbone total, carbone organique total, ratio C:N et carbone inorganique, des sédiments de la carotte CF02-02A	113
<b>Figure IV.2-6 :</b> Teneur en carbone organique total, indice d'hydrogène et indice d'oxygène dérivés de la pyrolyse Rock-Eval 6, des sédiments de la carotte CF02-02A.	114
<b>Figure IV.2-7 :</b> Distribution : <b>A</b> – des valeurs d'IO contre les teneurs en COT ; <b>B</b> – de l'IH contre l'IO ; et <b>C</b> – du S2 contre le COT, dérivés de la pyrolyse Rock-Eval 6, des sédiments de la carotte CF02-02A.	117
<b>Figure IV.2-8 :</b> Évolution des proportions relatives en fonction de la profondeur des trois principales fractions de chaque origine terrestre (A)* et marine (B)** respectivement, pour la carotte CF02-02A.	121
<b>Figure IV.2-9 :</b> Exemples des classes de palynofaciès rencontrés dans les sédiments de la carotte CF02-02A	122
<b>Figure IV.2-10 :</b> Distribution en profondeur de proportions relatives des fractions palynologiques selon l'origine supposée (allochtone/autochtone) et leur rapport.	123
<b>Figure IV.2-11 :</b> Distribution, en fonction de la profondeur, des quantités de n-alcanes selon la longueur des chaînes et selon leur nombre pair ou impair de carbones.	125
<b>Figure IV.2-12 :</b> Profils de : <b>A</b> – la teneur en n-alcanes courts, en n-alcanes longs et la teneur générale en n-alcanes ; <b>B</b> – du rapport entre la teneur en n-alcanes longs et de la teneur en n-alcanes courts (TAR); <b>C</b> – de l'indice de préférence de carbone CPI; et <b>D</b> – de la longueur moyenne de chaînes, le long de la carotte CF02-02A.	126
<b>Figure IV.2-13 :</b> Quelques exemples de distributions des n-alcanes dans la carotte CF02-02A.	127

<b>Figure IV.2-14 :</b> <b>A</b> - Comparaison entre le profil de concentration du n-alcane C <sub>33</sub> et la somme des concentrations des n-alcane longs impairs ; <b>B</b> – proportion du n-alcane C <sub>33</sub> en relation à la quantité totale de n-alcane et à la quantité de n-alcane longs impairs ; <b>C</b> – rapport entre le n-alcane C <sub>33</sub> et le n-alcane long majoritaire (C <sub>29</sub> ), le long de la carotte CF02-02A	131
<b>Figure IV.2.15 :</b> Paléotempératures des eaux de surface de la région de Cabo Frio.	135
<b>Figure IV.3-1 :</b> Typologie de la matière organique sédimentaire par unité lithologique de la carotte CF02-02A représenté sur le diagramme COT x S2 (adapté de Langford & Blanc-Valleron, 1990 in Tyson, 1995).	138
<b>Figure IV.3-2 :</b> Typologie de la matière organique sédimentaire par unité lithologique de la carotte CF02-02A, par le diagramme IO x IH : Détail du pseudo diagramme de Van Krevelen.	139
<b>Figure IV.3-3 :</b> L'évolution du niveau moyen de la mer confronté à la coupure lithologique (SCOPIX) de la carotte CF02-02A.	142
<b>Figure IV.3-4 :</b> Modèle de circulation de région de l'enfoncement sud brésilien proposé par Mesquita (2000) (en haut à gauche) ; les températures de surface de mer en 20/07/93 (en haut à droite) ; et les trajectoires observées de deux flotteurs/dériveurs du programme COROAS entre février et août 1993, au large de côte SE du Brésil (Stevenson <i>et al.</i> , 1998 et Assirieu <i>et al.</i> , 2003) (en bas).	146
<b>Figure V.1-1 :</b> Localisation géographique du Pérou et de la province de Callao (entouré par la ville de Lima, en rouge dans le détail), modèle digital d'élévation de terrain de la côte SE Pacifique et Image satellite de la région de Lima (mai 1997).	153
<b>Figure V.1-2 :</b> <b>A</b> - Localisation générale des zones de pêche des principales prises de la côte ouest Sud-Américaine (anchois, sardine, merlu, chinchard), et <b>B</b> - Historique des captures d'anchois et de sardines au Pérou et au Chili entre 1950 et 1996.	154
<b>Figure V.1-3 :</b> <b>A</b> – Courants océaniques du secteur sud-est de l'océan Pacifique ; <b>B</b> – Section côte-large à 10°S montrant le flux géostrophique, après l'El Niño de 1982-1983. Les courants qui fluent vers l'équateur sont indiqués par des lignes pointillées.	157
<b>Figure V.1-4:</b> Schéma de distribution des masses d'eau superficielles au large de la côte péruvienne: <b>A</b> – en périodes normales, et <b>B</b> – en périodes El Niño.	160
<b>Figure V.1-5:</b> Concentrations de Chlorophylle-a à la surface de la mer, estimées à partir des données collectées pendant les cinq premières années de mesures satellitales SeaWiFS. <b>A</b> – période d'été austral (décembre à février) ; <b>B</b> – période d'hiver austral (juin à août). <b>C</b> – profil de concentration de Chlorophylle-a transversale à la plateforme pérouvienne (10° et 12°S). Exprimés en mg·m <sup>-3</sup> .	162



- Figure V.1-6 :** **A** - Section vertical de teneur en oxygène ( $\mu\text{M}\cdot\text{Kg}^{-1}$ ) le long des  $14,5^\circ\text{S}$ . La ligne de  $30 \mu\text{M}\cdot\text{Kg}^{-1}$  correspond à approximativement  $0,7 \text{ ml}\cdot\text{l}^{-1}$ . Il est notable que les valeurs inférieures à  $9 \mu\text{M}\cdot\text{Kg}^{-1}$  ( $0.2 \text{ ml}\cdot\text{l}^{-1}$ ) s'étalent entre 50 et 500 m.  
**B** - distribution latitudinale de l'épaisseur de la ZOM ( $\text{O}_2 < 0,5 \text{ ml}\cdot\text{l}^{-1}$ ) sur la marge ouest de l'Amérique du Sud. 163
- Figure V.1-7 :** Cartes des climats (**A**) et de pluviométrie (**B**) du Pérou. 165
- Figure V.1-8 :** Le vent climatologique à 1 000 mb (à droite), et la pression atmosphérique au niveau de la mer (à gauche), pendant l'été (**A**) et l'hiver (**B**) australs. Les moyennes saisonnières ont été obtenues à partir de ré-analyses NCEP (National centers for environmental prediction – EUA). Les parties hachurées correspondent à des zones de très fortes précipitations. 166
- Figure V.1-9 :** Les températures de surface de l'Océan Pacifique équatorial, qui caractérisent les phases positives chaudes (El-Niño) et les phases négatives froides (La-Niña) de l'oscillation ENSO 169
- Figure V.1-10:** Sir Gilbert Walker fournit un élément important pour la compréhension d'El Niño quand il découvrit que les pressions au niveau de la mer dans le Pacifique sud oscillaient entre deux états distincts. Pendant une phase d'indice haut de ce que Walker a dénommé "Oscillation Australe" (en haut, pour novembre 1988), la pression est plus élevée (rouge sombre) près et à l'est de Tahiti qu'à l'ouest dans la région de Darwin. Ce gradient de pression le long de l'équateur entraîne l'air vers l'ouest (flèche longue). Quand l'atmosphère bascule dans une phase d'indice bas (en bas, pour novembre 1982), les baromètres sont à la hausse dans l'ouest et à la baisse dans l'est, signalant une réduction, voire une inversion, de la différence de pression entre Darwin et Tahiti. L'aplatissement de cette structure de pression provoque l'affaiblissement des alizés de surface, et leur retrait vers l'est. On sait que cette phase d'indice bas est habituellement accompagnée de conditions El Niño 171
- Figure V.1-11 :** Les températures de surface de l'Océan Pacifique boréal, qui caractérisent les phases positives (chaudes) et les phases négatives (froides) de l'oscillation décennale du Pacifique. 172
- Figure V.1-12:** Carte du réseau hydrographique Péruvien, zoom sur la côte centrale autour de Callao. 174
- Figure V.1-13 :** **A** - Précipitations annuelles dans la partie centrale du versant Pacifique ;  
**B** - Débit annuel dans une station du fleuve Rimac, en amont de Lima. 174
- Figure IV.1-14 :** Distribution spatiale des teneurs en carbone organique (à gauche) ; et, Distribution spatiale des fractions granulométriques fines (silt + argiles) (à droite) des sédiments superficiels de la plateforme continentale centro-nord du Pérou. 176
- Figure V.2-1 :** **A** - Position de la carotte B13 par rapport à la distribution bathymétrique de la plateforme continentale centrale du Pérou.  
**B** – Le carottier utilisé à bord du BIC José Olaya Balandra. 177

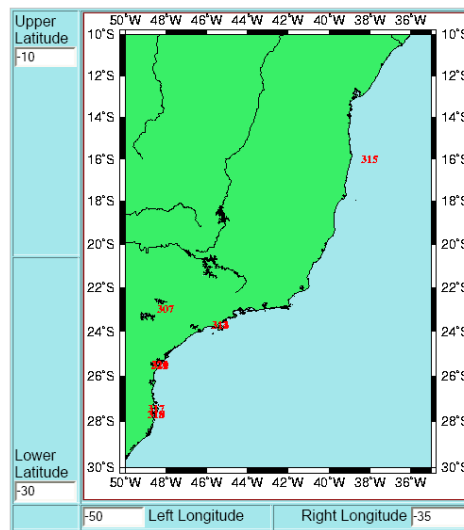
<b>Figure V.2-2 :</b> Images SCOPIX, photos et images SCOPIX traitées des sections de la carotte B13.	180
<b>Figure V.2-3 :</b> Lithologie, niveaux de gris (SCOPIX) et densité apparente de la carotte B13.	181
<b>Figure V.2-4 :</b> Chronologie, taux de sédimentation et résolution temporelle de l'échantillonnage de la carotte B13.	185
<b>Figure V.2-5 :</b> Teneurs élémentaires de carbone total, carbone organique total, ratio C:N et carbone inorganique, des sédiments de la carotte B13	188
<b>Figure V.2-6 :</b> Teneur en carbone organique total, indice d'hydrogène et indice d'oxygène dérivés de la pyrolyse Rock-Eval 6, des sédiments de la carotte B13.	191
<b>Figure V.2-7 :</b> Diagrammes de dispersion : <b>A</b> – des variables IO <i>versus</i> COT ; <b>B</b> – IH <i>versus</i> IO ; et <b>C</b> – S2 <i>versus</i> COT, dérivés de la pyrolyse Rock-Eval 6, des sédiments de la carotte B13.	192
<b>Figure V.2-8 :</b> Distribution selon la profondeur des proportions relatives des fractions palynologiques selon les deux sources supposées, terrestre et marine (allochtone/autochtone), et leur rapport.	196
<b>Figure V.2-9 :</b> Évolution des proportions relatives en fonction de la profondeur des trois principales fractions de chaque origine allochtone (terrestre) (A)* et autochtone (marine) (B)** respectivement, pour la carotte B13.	197
<b>Figure V.2-10 :</b> Exemples des classes de palynofaciès rencontrés dans les sédiments de la carotte B13.	198
<b>Figure V.2-11 :</b> Distribution, en fonction de l'âge, des concentrations des n-alcanes selon la longueur des chaînes et selon leur nombre pair ou impair de carbonés.	203
<b>Figure V.2-12 :</b> Profils de : <b>A</b> – la teneur en n-alcanes courts, en n-alcanes longs et la teneur générale en n-alcanes ; <b>B</b> – de l'indice de préférence de carbone CPI; et <b>C</b> – de la longueur moyenne des chaînes, le long de la carotte B13.	204
<b>Figure V.2-13 :</b> Quelques exemples de distribution des n-alcanes le long de la carotte B13.	205
<b>Figure V.2-14 :</b> <b>A</b> - Comparaison entre le profil de concentration du n-alcane C <sub>33</sub> et la somme des concentrations des n-alcanes longs impairs ; <b>B</b> – proportion du n-alcane C <sub>33</sub> en relation à la quantité de n-alcanes longs impairs ; <b>C</b> – rapport entre le n-alcane C <sub>33</sub> et le n-alcane long majoritaire (C <sub>29</sub> ), le long de la carotte B13.	207
<b>Figure V.2-15 :</b> Paléotempératures des eaux de surface de la région du Callao.	211
<b>Figure V.3-1 :</b> représentation schématique de la dynamique spatiale de l' <i>upwelling</i> , montrant la situation paléo-océanographique de bas niveau marin pendant le dépôt de la première moitié de la carotte ( <b>A</b> ), et comparée aux différents scénarios actuels sur la disposition de la cellule d' <i>upwelling</i> ( <b>B</b> , <b>C</b> et <b>D</b> ). Le schéma C correspondrait à la situation environnementale de dépôt de l'unité V.	214

<b>Figure V.3-2 :</b> Chronologie de la base de la carotte B13, montrant le décalage entre le modèle d'âge et les datations présentant un effet de vieillissement. Les flèches rouges représentant ce décalage se réduisent vers le sommet et illustrent la baisse de l'effet réservoir océanique régional.	215
<b>Figure VI-1 :</b> Représentation graphique de l'analyse statistique en composantes principales des distributions des niveaux de gris, COT, IO et IH de la carotte B13 (à gauche) et de la carotte CF02A (à droite).	225
<b>Figure VI-2 :</b> Comparaison des données paléoclimatiques et paléoenvironnementales obtenues dans ce travail et celles provenant d'autres sites clefs de l'Amérique du Sud.	227
<b>Figure VI-3 :</b> Analyse par ondelettes des fréquences que modulent les variations de l'IO et de l'IH des carottes B13 (à gauche) et CF02A (à droite), pendant le tardi glaciaire et l'Holocène Moyen.	228
<b>Figure VI-4 :</b> Comparaison des enregistrements sédimentaires du Cabo Frio (en bas) et de Callao (en haut) à l'évolution du niveau de la mer au Barbades durant le post-glaciaire.	230
<b>Figure VI-5 :</b> Détail de la période récente de la Figure V-2 (page 220) - Comparaison entre les données paléoclimatiques et paléoenvironnementales obtenues dans ce travail et celles provenant d'autres sites clefs de l'Amérique du Sud.	235
<b>Figure VI-6 :</b> Analyse par ondelettes des fréquences que modulent les variations de l'IO et de l'IH des carottes B13 (à gauche) et CF02A (à droite), durant l'Holocène supérieur.	236
<b>Figure X-1 :</b> Valeurs des effets réservoirs de côte centrale brésilienne	272
<b>Figure X-2 :</b> Valeurs des effets réservoirs de côte centrale Pérouvienne	273
<b>Figure X-3A :</b> Profils en fonction du temps des classes des palynofaciès de carotte CF02-02A.	324
<b>Figure X-3B :</b> Profils en fonction du temps des classes des palynofaciès de carotte CF02-02A.	325
<b>Figure X-4A :</b> Profils en fonction du temps des classes des palynofaciès de carotte B13.	328
<b>Figure X-4B :</b> Profils en fonction du temps des classes des palynofaciès de carotte B13.	329

## **X. – Annexes**

# *X.1. – Effets réservoir figurant sur la base de données en ligne « <http://calib.qub.ac.uk/marine> »*

## **X.1.1. – Site Atlantique sud-ouest**



Friday June 08, 2007:15:55  
Connected to marine database

Reset

MapNo	Lat	Lon	$\Delta R$	$\sigma$
307	-23.00	-43.00	-59	42
311	-23.73	-45.34	-11	40
312	-23.73	-45.34	48	40
313	-23.73	-45.34	-11	40
314	-23.73	-45.34	-71	40
315	-16.00	-38.00	38	40

npts: 6

Weighted Mean  $\Delta R$ : -10

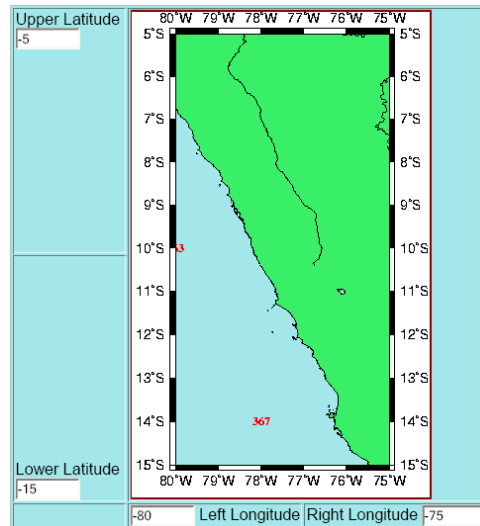
Standard Deviation: 48

Weighted Mean Measurement Error: 16

$\Delta R$  Uncertainty is the larger of Standard Deviation and Weighted Mean Measurement Error

**Figure X-1 : Valeurs des effets réservoirs de côte centrale brésilienne**

### X.1.2. – Site Pacifique sud-est



Friday January 01, 2007:14:13  
Connected to marine database

Reset

MapNo	Lat	Lon	$\Delta R$	$\sigma$
363	-10.00	-80.00	243	49
367	-14.00	-78.00	670	44

npts: 2

Weighted Mean  $\Delta R$ : 479

Standard Deviation: 335

Weighted Mean Measurement Error: 33

$\Delta R$  Uncertainty is the larger of Standard Deviation and Weighted Mean Measurement Error

**Figure X-2 :** Valeurs des effets réservoirs de côte centrale Pérouviene.



## X.2. – Tableaux de données obtenus du site

### X.2.1. – Site Atlantique sud-ouest

**Tableau X-1 :** Données chronologiques et lithologiques de la carotte CF02-02A

<i>Profondeur (cm)</i>	<i>Âge (ans cal BP)</i>	<i>Taux de sédimentation (cm-an<sup>-1</sup>)</i>	<i>Résolution temporelle (ans-cm<sup>-1</sup>)</i>	<i>Densité (g-cm<sup>-3</sup>)</i>	<i>Niveau de gris (Valeur)</i>
0,5	2057	0,04	28	1,56	5708
1,5	2085	0,04	28	1,04	5983
2,5	2113	0,04	27	1,21	5971
3,5	2140	0,04	27	1,52	6033
4,5	2167	0,04	27	1,64	6053
5,5	2195	0,04	28	1,37	6038
6,5	2223	0,04	28	1,07	5906
7,5	2250	0,04	28	1,33	5769
8,5	2279	0,04	28	1,33	5694
9,5	2307	0,03	29	1,04	5865
10,5	2336	0,03	29	1,41	5903
11,5	2365	0,03	30	1,22	5752
12,5	2395	0,03	30	1,96	5891
13,5	2426	0,03	31	1,58	6012
14,5	2457	0,03	32	1,92	6115
15,5	2489	0,03	32	1,87	6159
16,5	2522	0,03	33	2,03	6162
17,5	2555	0,03	34	2,31	6165
18,5	2590	0,03	35	2,12	6188
19,5	2626	0,03	36	1,78	6239
20,5	2662	0,03	37	1,97	6286
21,5	2700	0,03	39	1,70	6173
22,5	2740	0,03	40	2,51	6157
23,5	2780	0,02	41	1,44	6107
24,5	2822	0,02	43	0,93	6101
25,5	2865	0,02	44	1,60	6145
26,5	2910	0,02	46	1,67	6113
27,5	2956	0,02	47	1,41	6187
28,5	3004	0,02	49	0,99	6199
29,5	3053	0,02	50	1,98	6143
30,5	3104	0,02	51	2,26	6222
31,5	3156	0,02	52	2,24	6224
32,5	3209	0,02	53	1,45	6252
33,5	3263	0,02	54	1,43	6236
34,5	3317	0,02	55	1,68	6128
35,5	3373	0,02	56	0,87	6142
36,5	3429	0,02	57	2,07	6257
37,5	3486	0,02	57	0,91	6203
38,5	3544	0,02	58	1,72	6150
39,5	3602	0,02	58	1,44	6250
40,5	3661	0,02	59	1,34	6232
41,5	3719	0,02	59	1,93	6152
42,5	3778	0,02	59	1,72	6112
43,5	3837	0,02	59	1,78	6084
44,5	3896	0,02	59	1,75	6126
45,5	3955	0,02	59	2,05	6125
46,5	4014	0,02	59	1,88	6120
47,5	4072	0,02	58	1,68	6061
48,5	4131	0,02	58	1,34	6070
49,5	4188	0,02	57	1,64	6174
50,5	4245	0,02	57	1,89	6145
51,5	4302	0,02	56	1,69	6117
52,5	4357	0,02	55	1,80	6019
53,5	4412	0,02	54	2,24	5969
54,5	4466	0,02	53	1,45	6008
55,5	4519	0,02	52	1,37	5962
56,5	4571	0,02	51	1,54	6039



# X - Annexes

57,5	4622	0,02	50	1,77	5987
58,5	4671	0,02	49	1,74	6004
59,5	4719	0,02	47	2,02	6046
60,5	4765	0,02	46	1,41	6093
61,5	4810	0,02	44	1,86	6031
62,5	4853	0,02	42	1,76	6013
63,5	4895	0,02	41	1,39	3965
64,5	4935	0,03	39	0,98	4554
65,5	4974	0,03	38	0,25	4899
66,5	5011	0,03	37	1,33	5585
67,5	5048	0,03	36	1,69	5605
68,5	5083	0,03	35	0,38	4579
69,5	5117	0,03	34	1,48	4107
70,5	5151	0,03	33	1,07	4138
71,5	5184	0,03	32	1,71	3893
72,5	5216	0,03	32	1,35	4076
73,5	5247	0,03	31	1,02	4461
74,5	5278	0,03	31	1,03	4144
75,5	5309	0,03	30	1,15	5010
76,5	5339	0,03	30	0,12	4557
77,5	5369	0,03	30	1,41	4912
78,5	5399	0,03	30	1,20	5482
79,5	5429	0,03	30	1,49	5942
80,5	5459	0,03	30	1,24	5981
81,5	5490	0,03	31	1,94	5778
82,5	5521	0,03	31	1,16	5992
83,5	5552	0,03	31	0,84	5463
84,5	5584	0,03	32	1,26	5608
85,5	5616	0,03	33	1,60	5776
86,5	5649	0,03	33	1,98	5765
87,5	5683	0,03	34	1,84	6087
88,5	5718	0,03	35	1,23	6217
89,5	5754	0,03	36	1,19	5978
90,5	5791	0,03	38	1,23	6283
91,5	5829	0,03	39	1,30	6293
92,5	5868	0,02	40	1,35	6193
93,5	5909	0,02	42	-0,09	6312
94,5	5952	0,02	43	1,22	6387
95,5	5996	0,02	45	1,08	6396
96,5	6042	0,02	47	1,62	6347
97,5	6089	0,02	49	1,23	6402
98,5	6139	0,02	51	1,32	6339
99,5	6190	0,02	53	0,93	6341
100,5	6244	0,02	55	1,19	6334
101,5	6300	0,02	57	1,83	6158
102,5	6358	0,02	59	0,96	6319
103,5	6418	0,02	61	1,30	6332
104,5	6481	0,02	63	1,12	6539
105,5	6545	0,02	65	0,88	6445
106,5	6610	0,02	66	1,43	6470
107,5	6677	0,01	68	1,22	6301
108,5	6746	0,01	69	0,61	6241
109,5	6815	0,01	70	1,19	6394
110,5	6885	0,01	70	1,15	6143
111,5	6956	0,01	71	1,39	6296
112,5	7027	0,01	71	0,85	6354
113,5	7098	0,01	72	1,29	6340
114,5	7170	0,01	72	0,78	6295
115,5	7242	0,01	71	1,58	6119
116,5	7313	0,01	71	1,54	6275
117,5	7384	0,01	71	1,27	6378
118,5	7454	0,01	70	1,18	6265
119,5	7523	0,01	69	1,32	6246
120,5	7591	0,01	68	1,40	6344
121,5	7659	0,02	66	1,49	6190
122,5	7724	0,02	65	1,57	6252
123,5	7789	0,02	63	1,16	6159
124,5	7851	0,02	62	1,36	6061
125,5	7912	0,02	60	1,23	6019
126,5	7970	0,02	57	1,54	6222
127,5	8026	0,02	55	1,42	6258
128,5	8080	0,02	53	1,58	6229
129,5	8132	0,02	51	1,46	6196

# X - Annexes

130,5	8183	0,02	50	1,29	6226
131,5	8231	0,02	48	1,69	6130
132,5	8279	0,02	47	2,05	6260
133,5	8325	0,02	45	0,43	6320
134,5	8370	0,02	44	1,09	6363
135,5	8414	0,02	44	1,47	6315
136,5	8457	0,02	43	1,62	6334
137,5	8500	0,02	42	1,02	6383
138,5	8542	0,02	42	1,12	6453
139,5	8584	0,02	42	1,45	6475
140,5	8626	0,02	42	1,32	6453
141,5	8668	0,02	42	1,43	6511
142,5	8710	0,02	43	1,38	6531
143,5	8753	0,02	43	0,73	6657
144,5	8797	0,02	44	1,41	6612
145,5	8841	0,02	45	1,71	6595
146,5	8886	0,02	46	1,87	6665
147,5	8932	0,02	47	1,90	6673
148,5	8980	0,02	48	1,50	6666
149,5	9029	0,02	50	1,69	6650
150,5	9080	0,02	51	1,75	6643
151,5	9131	0,02	52	1,22	6718
152,5	9184	0,02	53	2,19	6752
153,5	9237	0,02	54	1,52	6785
154,5	9291	0,02	54	1,65	6821
155,5	9345	0,02	55	1,57	6785
156,5	9400	0,02	55	1,29	6734
157,5	9455	0,02	55	1,62	6772
158,5	9509	0,02	55	2,08	6811
159,5	9564	0,02	54	1,51	6863
160,5	9618	0,02	54	1,95	6943
161,5	9671	0,02	53	1,16	6948
162,5	9723	0,02	52	1,99	6835
163,5	9775	0,02	51	1,81	6868
164,5	9825	0,02	50	2,50	6553
165,5	9875	0,02	48	0,75	6725
166,5	9922	0,02	47	2,08	6927
167,5	9968	0,02	45	2,39	6889
168,5	10013	0,02	43	2,41	6825
169,5	10055	0,02	41	1,92	6840
170,5	10095	0,03	39	2,07	6882
171,5	10132	0,03	36	1,37	6867
172,5	10168	0,03	34	1,76	6913
173,5	10200	0,03	31	1,94	6906
174,5	10230	0,04	28	1,80	6990
175,5	10257	0,04	26	1,84	6984
176,5	10282	0,04	24	1,86	6949
177,5	10305	0,04	23	1,79	6936
178,5	10328	0,05	22	1,79	6912
179,5	10349	0,05	21	1,43	6889
180,5	10370	0,05	21	1,85	6886
181,5	10390	0,05	21	2,53	6879
182,5	10411	0,05	21	2,45	6875
183,5	10433	0,04	22	2,43	6942
184,5	10456	0,04	24	1,61	6955
185,5	10481	0,04	25	1,91	6899
186,5	10507	0,04	28	2,09	6889
187,5	10536	0,03	30	2,10	6861
188,5	10567	0,03	33	0,64	6865
189,5	10602	0,03	36	0,64	6854
190,5	10640	0,02	40	0,59	6854
191,5	10682	0,02	44	0,75	6878
192,5	10728	0,02	47	0,62	6981
193,5	10777	0,02	51	0,72	7036
194,5	10829	0,02	54	0,51	7070
195,5	10885	0,02	57	0,49	7005
196,5	10943	0,02	59	0,55	7015
197,5	11004	0,02	62	0,87	7028
198,5	11067	0,02	64	0,70	6923
199,5	11132	0,02	66	0,66	7058
200,5	11199	0,01	68	0,63	7049
201,5	11267	0,01	69	0,73	7035
202,5	11337	0,01	71	0,65	7025

## X - Annexes

203,5	11408	0,01	72	0,55	7039
204,5	11481	0,01	72	0,65	7188
205,5	11553	0,01	73	0,76	7055
206,5	11627	0,01	73	0,65	7075
207,5	11700	0,01	73	0,59	7085
208,5	11773	0,01	73	0,75	7103
209,5	11847	0,01	73	0,69	7171
210,5	11919	0,01	72	0,59	7192
211,5	11992	0,01	72	0,52	7271
212,5	12063	0,01	71	0,61	7267
213,5	12133	0,01	69	0,59	7351
214,5	12201	0,01	68	0,56	7265
215,5	12268	0,02	66	0,61	7254
216,5	12333	0,02	64	0,64	7153
217,5	12396	0,02	62	0,60	7072
218,5	12457	0,02	59	0,57	6957
219,5	12515	0,02	57	0,73	6789
220,5	12571	0,02	54	0,49	6697
221,5	12623	0,02	51	0,61	6661
222,5	12672	0,02	47	0,68	6870
223,5	12718	0,02	44	0,48	7056
224,5	12760	0,02	40	0,66	7078
225,5	12798	0,03	36	0,66	7268
226,5	12832	0,03	32	0,67	7281
227,5	12861	0,04	27	0,55	7265

**Tableau X-2 : Données géochimiques élémentaires et de pyrolyse Rock-Eval de la carotte CF02-02A**

<b>Prof.</b> <b>(cm)</b>	<b>Âge</b> <b>(ans cal</b> <b>BP)</b>	<b>N</b> <b>(%)</b>	<b>C</b> <b>(%)</b>	<b>COT</b> <b>(%)</b>	<b>C-COT</b> <b>(%)</b>	<b>COT:N</b> <b>(Atomique)</b>	<b>IH</b> <b>(mg HC *</b> <b>g COT<sup>-1</sup>)<sup>1)</sup></b>	<b>IO</b> <b>(mg O<sub>2</sub> *</b> <b>g COT<sup>-1</sup>)</b>
0,5	2057	0,12	4,12	0,88	3,24	8,62	236	179
1,5	2085	0,12	4,21	0,92	3,29	9,13	252	221
2,5	2113	0,13	4,22	0,79	3,43	6,93	285	269
3,5	2140	0,15	4,25	1,36	2,89	10,42	174	171
4,5	2167	0,14	4,38	0,95	3,43	8,10	178	218
5,5	2195	0,17	4,48	1,09	3,39	7,67	217	207
6,5	2223	0,21	4,42	0,96	3,46	5,40	307	230
7,5	2250	0,19	4,34	0,65	3,69	4,08	362	328
8,5	2279	0,22	4,41	1,34	3,07	7,24	251	215
9,5	2307	0,22	4,43	0,97	3,46	5,21	386	307
10,5	2336	0,20	4,44	1,19	3,25	7,11	263	223
11,5	2365	0,19	4,34	1,16	3,18	7,12	268	219
12,5	2395	0,19	4,45	1,22	3,23	7,50	266	232
13,5	2426	0,16	4,25	0,97	3,28	6,92	261	226
14,5	2457	0,15	4,20	0,85	3,35	6,78	294	207
15,5	2489	0,10	4,32	0,70	3,62	8,26	350	259
16,5	2522	0,14	4,30	0,65	3,65	5,39	334	227
17,5	2555	0,14	4,16	0,76	3,40	6,33	326	265
18,5	2590	0,13	4,14	0,66	3,48	6,05	218	290
19,5	2626	0,15	4,24	0,76	3,48	6,02	208	294
20,5	2662	0,11	4,23	0,64	3,59	6,61	212	298
21,5	2700	0,11	4,27	0,59	3,68	6,05	217	338
22,5	2740	0,14	4,38	0,79	3,59	6,76	195	276
23,5	2780	0,12	3,54	0,72	2,82	6,97	197	321
24,5	2822	0,15	5,01	0,63	4,38	4,88	219	308
25,5	2865	0,11	3,62	0,67	2,95	6,82	230	240
26,5	2910	0,12	4,04	1,08	2,96	10,90	156	164
27,5	2956	0,21	6,14	1,00	5,14	5,68	155	229
28,5	3004	0,14	4,57	0,99	3,58	8,16	163	219
29,5	3053	0,13	4,60	0,86	3,74	7,62	220	264
30,5	3104	0,21	6,76	0,83	5,93	4,57	220	278
31,5	3156	0,10	3,97	0,92	3,05	10,49	178	255
32,5	3209	0,11	4,27	0,84	3,43	8,52	186	252
33,5	3263	0,16	6,45	0,93	5,52	6,71	262	280
34,5	3317	0,07	2,78	0,87	1,91	14,07	254	269
35,5	3373	0,15	5,38	1,10	4,28	8,52	183	211
36,5	3429	0,15	5,54	0,79	4,75	6,22	210	277
37,5	3486	0,09	3,51	0,68	2,83	8,44	229	303
38,5	3544	0,14	4,86	0,60	4,26	5,17	280	400
39,5	3602	0,19	6,58	0,87	5,71	5,40	164	222
40,5	3661	0,07	2,94	0,85	2,09	13,60	158	211
41,5	3719	0,09	3,38	0,97	2,41	12,08	148	205
42,5	3778	0,13	4,72	0,58	4,14	5,15	202	278
43,5	3837	0,13	5,11	0,76	4,35	6,64	204	279
44,5	3896	0,16	5,59	0,65	4,94	4,86	198	277
45,5	3955	0,09	3,30	0,77	2,53	10,06	184	282
46,5	4014	0,12	4,21	0,71	3,50	7,08	190	290
47,5	4072	0,14	4,32	0,60	3,72	4,97	253	300
48,5	4131	0,14	4,45	0,78	3,67	6,67	210	277
49,5	4188	0,11	4,19	0,73	3,46	7,41	207	268
50,5	4245	0,11	4,13	0,68	3,45	7,18	191	316
51,5	4302	0,11	4,05	0,94	3,11	9,85	130	198
52,5	4357	0,12	4,32	0,67	3,65	6,43	212	292
53,5	4412	0,12	4,14	0,67	3,47	6,32	196	287
54,5	4466	0,11	4,33	0,59	3,74	6,31	203	327
55,5	4519	0,12	4,29	0,68	3,61	6,50	190	296
56,5	4571	0,11	4,19	0,63	3,56	6,56	203	296
57,5	4622	0,13	4,11	0,91	3,20	8,48	153	241
58,5	4671	0,10	4,33	0,78	3,55	8,89	135	200
59,5	4719	0,13	4,18	0,99	3,19	8,87	152	192
60,5	4765	0,12	4,47	0,84	3,63	8,24	150	247
61,5	4810	0,12	4,28	0,73	3,55	7,29	179	290
62,5	4853	0,10	4,26	0,82	3,44	9,58	159	258
63,5	4895	0,11	4,24	0,91	3,33	9,57	151	231

# X - Annexes

64,5	4935	0,13	4,25	0,76	3,49	6,82	212	322
65,5	4974	0,12	4,36	0,74	3,62	7,37	196	278
66,5	5011	0,13	4,17	0,90	3,27	8,37	150	234
67,5	5048	0,12	4,25	0,95	3,30	9,53	139	223
68,5	5083	0,12	4,21	0,90	3,31	8,70	158	240
69,5	5117	0,13	4,27	0,68	3,59	6,10	212	330
70,5	5151	0,12	4,23	0,72	3,51	6,77	188	283
71,5	5184	0,14	4,33	0,86	3,47	7,10	177	275
72,5	5216	0,11	4,23	0,68	3,55	7,17	188	288
73,5	5247	0,12	4,22	0,87	3,35	8,69	146	247
74,5	5278	0,13	4,29	0,82	3,47	7,43	178	281
75,5	5309	0,13	4,34	0,78	3,56	7,11	192	292
76,5	5339	0,12	4,31	0,69	3,62	6,64	217	282
77,5	5369	0,09	4,30	0,74	3,56	9,95	193	280
78,5	5399	0,09	4,02	0,72	3,30	9,22	135	220
79,5	5429	0,10	4,05	0,71	3,34	8,55	156	231
80,5	5459	0,12	4,54	0,91	3,63	8,89	149	231
81,5	5490	0,09	4,12	0,59	3,53	7,81	186	305
82,5	5521	0,11	4,20	0,71	3,49	7,41	175	302
83,5	5552	0,11	4,23	0,78	3,45	8,31	156	245
84,5	5584	0,11	4,03	0,59	3,44	6,53	210	317
85,5	5616	0,10	4,16	0,90	3,26	11,04	129	210
86,5	5649	0,11	4,13	0,75	3,38	8,20	155	215
87,5	5683	0,12	4,44	1,07	3,37	10,61	133	196
88,5	5718	0,10	4,45	0,63	3,82	7,33	202	293
89,5	5754	0,12	4,26	0,64	3,62	6,20	216	305
90,5	5791	0,09	3,55	0,99	2,56	12,52	143	202
91,5	5829	0,15	4,94	1,10	3,84	8,67	150	209
92,5	5868	0,13	4,41	0,79	3,62	7,18	206	271
93,5	5909	0,22	4,47	0,67	3,80	3,61	201	263
94,5	5952	0,19	4,47	0,90	3,57	5,39	156	208
95,5	5996	0,21	4,65	0,74	3,91	4,06	166	225
96,5	6042	0,19	4,31	1,07	3,24	6,72	153	193
97,5	6089	0,18	4,46	0,68	3,78	4,32	209	285
98,5	6139	0,31	4,49	0,82	3,67	3,05	170	220
99,5	6190	0,24	4,30	0,80	3,50	3,83	154	231
100,5	6244	0,18	4,34	0,96	3,38	6,26	154	206
101,5	6300	0,22	4,46	0,96	3,50	5,02	170	217
102,5	6358	0,25	4,49	1,23	3,26	5,71	147	159
103,5	6418	0,31	4,35	0,96	3,39	3,65	170	195
104,5	6481	0,24	4,48	1,06	3,42	5,22	178	200
105,5	6545	0,31	4,57	0,98	3,59	3,73	197	225
106,5	6610	0,21	4,67	1,23	3,44	6,83	172	179
107,5	6677	0,29	4,49	1,12	3,37	4,45	176	204
108,5	6746	0,22	4,90	1,32	3,58	6,88	182	189
109,5	6815	0,20	5,13	0,61	4,52	3,57	290	373
110,5	6885	0,31	4,66	1,11	3,55	4,24	174	200
111,5	6956	0,24	4,63	1,00	3,63	4,76	170	207
112,5	7027	0,26	4,51	1,00	3,51	4,57	166	209
113,5	7098	0,31	4,55	1,17	3,38	4,47	160	186
114,5	7170	0,17	4,35	0,94	3,41	6,36	168	208
115,5	7242	0,18	4,39	0,83	3,56	5,31	169	213
116,5	7313	0,26	4,66	1,17	3,49	5,23	166	186
117,5	7384	0,20	4,47	1,06	3,41	6,29	161	195
118,5	7454	0,18	4,47	0,95	3,52	6,04	176	189
119,5	7523	0,32	4,72	0,91	3,81	3,32	142	198
120,5	7591	0,22	4,65	0,92	3,73	4,86	155	196
121,5	7659	0,12	4,57	1,17	3,40	11,23	173	189
122,5	7724	0,09	4,48	0,88	3,60	11,15	142	198
123,5	7789	0,10	4,49	1,02	3,47	12,37	164	193
124,5	7851	0,09	4,61	0,97	3,64	12,10	154	202
125,5	7912	0,12	4,94	1,05	3,89	10,35	158	195
126,5	7970	0,09	4,29	0,78	3,51	9,99	159	212
127,5	8026	0,10	4,29	1,16	3,13	12,99	162	189
128,5	8080	0,09	4,17	0,62	3,55	7,75	213	294
129,5	8132	0,07	3,49	0,78	2,71	13,08	156	212
130,5	8183	0,12	4,63	0,85	3,78	8,03	129	204
131,5	8231	0,10	4,33	0,87	3,46	10,60	149	230
132,5	8279	0,16	4,41	1,04	3,37	7,39	151	187
133,5	8325	0,09	4,42	0,94	3,48	12,12	154	212
134,5	8370	0,15	4,17	1,08	3,09	8,59	160	198
135,5	8414	0,10	4,36	1,03	3,33	11,81	166	194
136,5	8457	0,08	3,75	0,81	2,94	12,03	152	201

# X - Annexes

137,5	8500	0,10	4,15	0,89	3,26	9,94	165	211
138,5	8542	0,08	4,47	0,65	3,82	9,89	152	239
139,5	8584	0,06	4,53	0,71	3,82	13,00	146	217
140,5	8626	0,10	4,19	0,94	3,25	11,14	173	190
141,5	8668	0,10	4,02	0,89	3,13	10,92	147	188
142,5	8710	0,09	4,43	0,91	3,52	11,23	162	206
143,5	8753	0,08	3,86	0,73	3,13	10,65	168	232
144,5	8797	0,07	4,19	0,72	3,47	11,56	158	221
145,5	8841	0,07	3,96	0,56	3,40	9,49	161	254
146,5	8886	0,06	3,97	0,62	3,35	12,29	142	210
147,5	8932	0,03	3,69	0,56	3,13	19,06	187	225
148,5	8980	0,06	4,17	0,52	3,65	10,02	138	243
149,5	9029	0,06	4,04	0,60	3,44	11,24	155	228
150,5	9080	0,07	3,91	0,49	3,42	8,62	173	254
151,5	9131	0,07	3,96	0,56	3,40	9,18	145	231
152,5	9184	0,06	3,94	0,48	3,46	9,14	152	243
153,5	9237	0,06	3,71	0,50	3,21	9,35	150	226
154,5	9291	0,06	3,92	0,45	3,47	8,40	171	259
155,5	9345	0,07	3,80	0,51	3,29	8,18	169	251
156,5	9400	0,07	3,93	0,51	3,42	8,78	161	242
157,5	9455	0,06	3,96	0,51	3,45	9,46	157	251
158,5	9509	0,06	4,33	0,39	3,94	7,62	174	296
159,5	9564	0,06	3,92	0,50	3,42	9,05	178	234
160,5	9618	0,07	4,60	0,47	4,13	8,22	151	233
161,5	9671	0,06	4,63	0,35	4,28	6,73	217	383
162,5	9723	0,06	4,16	0,43	3,73	8,72	193	295
163,5	9775	0,04	4,74	0,45	4,29	11,83	164	343
164,5	9825	0,06	4,76	0,39	4,37	7,59	182	315
165,5	9875	0,05	5,28	0,36	4,92	8,41	181	275
166,5	9922	0,06	4,69	0,46	4,23	8,30	163	257
167,5	9968	0,06	4,78	0,39	4,39	7,91	167	292
168,5	10013	0,06	5,21	0,34	4,87	6,17	218	348
169,5	10055	0,06	5,05	0,51	4,54	10,61	125	245
170,5	10095	0,06	4,86	0,35	4,51	6,63	169	327
171,5	10132	0,05	4,79	0,35	4,44	7,47	157	276
172,5	10168	0,06	4,34	0,38	3,96	7,70	161	290
173,5	10200	0,05	4,62	0,28	4,34	6,50	204	396
174,5	10230	0,06	4,73	0,40	4,33	7,50	155	289
175,5	10257	0,06	4,49	0,41	4,08	7,95	151	258
176,5	10282	0,06	4,76	0,37	4,39	6,98	154	312
177,5	10305	0,03	5,14	0,37	4,77	14,61	189	281
178,5	10328	0,05	5,01	0,42	4,59	10,80	145	252
179,5	10349	0,05	5,24	0,36	4,88	7,74	144	301
180,5	10370	0,06	6,09	0,30	5,79	6,02	190	357
181,5	10390	0,05	5,45	0,35	5,10	8,88	140	310
182,5	10411	0,05	5,04	0,37	4,67	9,26	146	298
183,5	10433	0,05	6,22	0,48	5,74	10,26	131	235
184,5	10456	0,06	5,02	0,42	4,60	8,45	138	259
185,5	10481	0,06	5,12	0,43	4,69	8,97	137	256
186,5	10507	0,04	6,34	0,30	6,04	9,60	157	366
187,5	10536	0,05	4,66	0,42	4,24	9,38	138	256
188,5	10567	0,06	4,68	0,44	4,24	9,27	148	247
189,5	10602	0,03	4,99	0,40	4,59	13,89	152	289
190,5	10640	0,04	6,17	0,41	5,76	12,02	124	265
191,5	10682	0,05	5,33	0,44	4,89	10,16	150	262
192,5	10728	0,04	5,65	0,39	5,26	10,64	123	301
193,5	10777	0,04	5,71	0,36	5,35	11,11	133	341
194,5	10829	0,04	6,68	0,39	6,29	10,26	123	351
195,5	10885	0,08	5,66	0,56	5,10	8,48	127	293
196,5	10943	0,03	5,99	0,23	5,76	8,59	135	356
197,5	11004	0,03	6,14	0,30	5,84	10,33	123	280
198,5	11067	0,04	6,66	0,31	6,35	8,77	116	332
199,5	11132	0,04	6,67	0,25	6,42	7,02	152	390
200,5	11199	0,03	7,12	0,28	6,84	9,71	114	376
201,5	11267	0,04	8,13	0,27	7,86	7,24	137	342
202,5	11337	0,04	7,74	0,30	7,44	8,59	123	330
203,5	11408	0,04	7,77	0,27	7,50	8,84	137	317
204,5	11481	0,02	6,53	0,28	6,25	18,57	136	356
205,5	11553	0,04	6,39	0,21	6,18	5,81	195	515
206,5	11627	0,02	6,81	0,30	6,51	15,26	127	330
207,5	11700	0,05	6,94	0,34	6,60	7,42	126	334
208,5	11773	0,03	7,14	0,29	6,85	11,55	138	336
209,5	11847	0,04	7,33	0,26	7,07	8,42	135	336

## X - Annexes

210,5	11919	0,04	7,01	0,28	6,73	9,00	118	300
211,5	11992	0,05	7,32	0,27	7,05	6,91	152	334
212,5	12063	0,03	8,73	0,28	8,45	9,93	121	324
213,5	12133	0,03	8,20	0,29	7,91	11,96	117	281
214,5	12201	0,03	8,06	0,27	7,79	10,36	126	348
215,5	12268	0,04	7,98	0,27	7,71	8,70	141	307
216,5	12333	0,04	7,23	0,25	6,98	8,30	128	356
217,5	12396	0,01	8,86	0,27	8,59	50,66	119	384
218,5	12457	0,01	8,07	0,26	7,81	20,24	150	394
219,5	12515	0,01	9,41	0,24	9,17	30,47	121	343
220,5	12571	0,02	10,07	0,23	9,84	12,03	104	362
221,5	12623	0,01	9,47	0,24	9,23	18,68	154	429
222,5	12672	0,03	9,71	0,24	9,47	9,51	121	418

# X - Annexes

**Tableau X-3 :** Données de la pétrographie organique (palynofaciès) de la carotte CF02-02A

Prof. (cm)	Âge (ans cal BP)	LCT (%)	LCA (%)	MOA Rou. (%)	LCO (%)	DG (%)	Myc. (%)	Pyrof. (%)	Sp- Po (%)	C-M (%)	Zoo. (%)	Din. (%)	Alg. (%)	MOA Gel. (%)	GAO (%)	MOA Flo. (%)	MOA Gru. (%)	MOA Opa. (%)	Pyrite (%)	Terr estre (%)	Marin (%)	Mar/Ter
0,5	2059	0,0	4,6	1,1	1,7	0,1	0,0	0,0	0,2	3,4	1,5	0,0	0,2	0,0	0,5	37,7	46,3	0,2	2,5	11,1	86,4	7,8
3,5	2142	1,8	3,5	4,2	3,3	0,9	0,0	1,3	1,9	16,7	6,4	0,0	0,0	1,0	0,1	16,7	40,5	0,0	1,6	33,7	64,7	1,9
4,5	2170	1,2	8,3	6,7	5,4	16,1	0,0	1,8	3,2	9,2	4,4	0,0	0,0	1,6	0,2	10,4	29,7	0,0	2,0	51,8	46,2	0,9
5,5	2198	0,0	0,8	1,6	2,8	0,4	0,0	0,1	0,5	5,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	39,9	44,2	0,2	4,3	11,2	84,5	7,5
7,5	2254	0,4	0,9	16,0	2,0	0,3	0,0	0,7	1,5	7,9	14,1	0,0	0,0	2,1	0,0	13,0	37,8	1,1	2,1	29,8	68,1	2,3
10,5	2340	0,0	2,6	0,7	2,8	0,5	0,0	0,2	0,1	2,8	0,0	0,0	1,0	1,2	0,2	34,9	48,1	0,5	4,4	9,8	85,9	8,8
15,5	2494	0,0	2,7	0,6	2,5	2,2	0,0	0,3	0,1	12,7	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	19,5	51,1	0,0	8,3	21,0	70,7	3,4
20,5	2668	0,0	0,3	0,2	1,5	1,2	0,0	0,1	0,1	4,9	0,1	0,0	2,1	0,3	0,3	29,6	54,4	0,3	4,5	8,3	87,2	10,5
21,5	2706	0,0	0,0	5,3	1,3	0,8	0,0	0,0	0,1	4,8	0,0	0,0	0,0	6,0	0,6	4,2	72,3	0,0	4,6	12,3	83,1	6,8
22,5	2745	0,0	0,5	1,4	0,5	0,3	0,0	0,0	0,2	5,4	3,2	0,0	0,0	3,6	0,2	0,0	73,7	0,0	10,9	8,4	80,7	9,6
25,5	2871	0,0	2,1	0,1	1,3	1,1	0,0	0,1	0,4	0,0	0,6	0,0	2,7	0,1	0,2	36,6	49,4	0,0	5,2	5,2	89,6	17,4
30,5	3109	0,0	0,8	5,5	1,8	0,3	0,0	0,6	0,0	3,8	0,0	0,0	1,2	0,4	1,7	26,7	52,7	0,6	3,9	12,8	83,3	6,5
35,5	3376	0,0	6,4	2,2	4,2	1,8	0,0	0,3	0,3	3,8	2,9	0,0	0,0	2,7	0,2	10,8	58,9	0,0	5,5	19,0	75,5	4,0
38,5	3546	0,0	6,7	0,7	1,9	8,4	0,0	0,0	0,0	6,2	2,0	0,0	0,0	1,9	0,4	14,2	51,3	0,0	6,3	23,8	69,8	2,9
39,5	3604	0,0	0,3	2,1	2,8	1,0	0,0	0,0	1,6	6,7	1,1	0,0	0,0	5,5	0,7	7,1	61,5	0,0	9,7	14,4	75,9	5,3
40,5	3662	0,0	3,7	0,2	2,3	3,7	0,0	0,0	0,1	0,5	0,0	0,0	1,8	0,3	0,4	35,2	47,8	0,3	3,7	10,5	85,8	8,2
45,5	3954	0,0	0,4	0,0	3,5	0,9	0,0	0,0	0,3	0,5	0,0	0,0	0,1	1,6	0,2	27,8	58,5	0,5	5,7	5,6	88,7	15,9
50,5	4242	0,0	0,0	0,0	3,0	3,7	0,0	0,0	0,2	4,3	2,6	0,0	0,4	0,9	0,3	25,9	51,7	0,3	6,6	11,3	82,1	7,3
55,5	4515	0,0	2,0	0,0	2,2	1,8	0,0	0,3	0,0	1,5	0,3	0,0	1,4	2,6	0,1	35,0	47,4	0,5	4,9	7,8	87,4	11,2
60,5	4760	0,0	0,4	0,0	2,7	1,0	0,0	0,1	0,1	1,2	0,2	0,0	1,0	1,7	0,2	31,4	53,3	0,3	6,5	5,4	88,1	16,4
62,5	4848	0,0	0,0	2,5	2,4	0,9	0,0	0,0	0,2	6,1	0,3	0,0	0,0	12,6	0,6	15,3	52,4	0,2	6,4	12,2	81,4	6,6
65,5	4969	0,0	0,2	0,3	2,7	1,0	0,0	0,0	1,1	0,8	0,0	0,0	5,0	1,9	0,1	30,0	49,0	1,0	6,7	6,1	87,2	14,3
67,5	5044	0,6	1,9	0,6	3,2	1,8	0,0	1,5	0,1	1,1	0,7	0,0	0,0	2,3	0,2	31,5	45,1	0,3	9,0	10,8	80,2	7,4
69,5	5114	0,0	12,8	3,1	3,1	8,1	0,0	0,8	0,0	8,5	1,8	0,0	3,7	0,0	0,2	12,7	39,5	0,2	5,4	36,5	58,1	1,6
70,5	5148	0,0	0,0	0,0	2,4	0,2	0,0	0,0	0,1	2,3	0,1	0,0	2,0	1,4	0,2	35,1	50,4	0,7	5,3	4,9	89,8	18,3
75,5	5308	0,0	0,3	0,2	3,5	0,1	0,0	0,0	0,2	0,9	2,8	0,0	0,0	5,0	0,2	31,3	49,3	0,6	5,7	5,2	89,2	17,3
80,5	5461	0,0	0,4	0,0	2,5	0,5	0,0	0,0	0,1	0,7	0,0	0,0	0,1	3,3	0,3	23,9	63,2	0,5	4,6	4,2	91,2	21,9
85,5	5620	0,0	0,6	0,0	2,3	3,0	0,0	0,0	0,0	2,2	0,0	0,0	0,7	1,5	0,3	26,9	54,5	0,3	7,5	8,2	84,3	10,3
88,5	5724	0,0	0,2	0,7	6,6	1,9	0,0	1,6	0,0	1,0	0,0	0,0	1,1	8,6	1,0	8,9	57,2	0,4	10,8	12,0	77,2	6,4
90,5	5797	0,0	0,1	3,2	3,7	1,0	0,0	0,0	0,0	2,9	0,0	0,0	0,0	3,1	0,4	17,6	62,4	0,5	5,2	10,8	83,9	7,7
91,5	5836	0,0	0,6	0,3	4,3	1,2	0,0	0,4	0,4	20,2	0,2	0,0	0,0	7,4	0,7	22,2	41,5	0,6	0,1	27,2	72,6	2,7
94,5	5960	0,0	5,1	2,3	8,9	7,4	0,0	0,1	2,2	4,4	5,7	0,0	0,0	12,2	1,2	12,6	30,1	1,0	6,8	30,4	62,8	2,1
95,5	6004	0,0	0,0	0,6	3,1	0,0	0,0	0,0	0,0	1,7	0,0	0,0	0,0	2,3	0,2	29,1	55,1	3,3	4,7	5,4	89,9	16,7
100,5	6254	0,0	0,3	0,0	3,4	0,3	0,0	0,0	0,0	2,6	0,0	0,0	0,0	1,4	0,3	27,4	58,1	0,4	5,8	6,7	87,5	13,1
105,5	6554	0,0	1,4	0,0	2,7	0,6	0,0	0,0	0,3	1,2	0,0	0,0	0,2	3,8	0,3	24,2	56,6	0,3	8,3	6,2	85,5	13,7
108,5	6754	0,0	3,1	2,5	6,4	4,2	0,0	1,0	0,8	9,4	7,5	0,0	0,0	5,9	0,5	17,8	34,6	0,2	6,2	27,4	66,4	2,4
109,5	6823	0,0	2,6	0,0	4,7	0,2	0,0	0,0	0,0	3,8	1,1	0,0	0,0	4,2	0,1	17,6	58,7	0,0	7,0	11,3	81,7	7,2
110,5	6893	0,0	0,0	0,0	3,1	4,4	0,0	0,0	0,3	2,1	0,0	0,0	0,0	2,3	0,1	16,3	65,8	0,4	5,2	9,9	84,9	8,6
115,5	7248	0,0	0,8	0,0	2,6	3,9	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,6	4,7	0,9	34,2	46,6	0,2	4,6	8,3	87,1	10,4
120,5	7596	0,0	6,6	0,1	5,0	5,2	0,0	0,7	0,0	6,0	2,5	0,0	0,0	3,4	0,5	7,1	56,2	0,3	6,4	23,5	70,1	3,0



# X - Annexes

125,5	7914	0,0	0,0	0,0	2,5	0,6	0,0	0,0	0,5	2,5	0,0	0,0	0,0	4,1	0,1	27,3	53,2	3,4	5,8	6,2	88,1	14,3
128,5	8082	0,0	0,0	0,0	2,6	0,9	0,0	0,0	0,0	3,4	2,3	0,0	0,0	1,9	0,1	38,4	43,8	0,5	5,9	7,0	87,2	12,5
130,5	8184	0,0	0,0	0,0	3,6	3,4	0,0	0,0	0,3	11,2	0,0	0,0	0,0	4,0	0,3	27,2	43,5	0,5	6,0	18,5	75,6	4,1
134,5	8371	0,0	0,0	1,8	9,5	2,5	0,0	0,0	0,0	3,4	0,0	0,0	0,0	16,3	0,6	10,2	45,7	0,3	9,8	17,2	73,0	4,3
135,5	8415	0,0	1,8	0,0	2,6	0,3	0,0	0,0	0,1	1,5	0,0	0,0	0,0	12,4	0,1	21,3	52,4	0,7	6,6	6,4	87,0	13,7
140,5	8627	0,0	1,3	0,0	3,1	0,3	0,0	0,0	0,1	4,1	0,0	0,0	0,8	6,9	0,1	27,7	49,4	0,2	6,2	8,8	85,1	9,7
145,5	8842	0,0	1,5	0,3	4,4	1,8	0,0	0,0	0,1	5,3	0,0	0,0	0,9	2,0	0,3	29,6	45,4	0,4	8,2	13,4	78,4	5,9
149,5	9030	0,0	9,2	0,0	6,2	3,4	0,0	0,0	3,0	9,2	7,6	0,0	0,0	8,5	0,2	9,8	41,9	0,4	0,6	31,0	68,4	2,2
150,5	9080	0,0	0,0	0,0	5,0	4,1	0,0	0,0	0,0	5,7	0,0	0,0	0,0	2,5	0,1	33,8	37,4	0,1	11,2	14,8	73,9	5,0
154,5	9291	0,0	0,0	0,0	9,3	23,6	0,0	0,3	0,2	7,0	1,0	0,0	0,0	19,3	0,7	0,0	25,0	0,6	13,0	40,3	46,6	1,2
155,5	9346	0,0	5,0	0,0	3,7	4,9	0,0	0,0	0,0	6,9	0,0	0,0	0,5	0,4	0,2	19,5	49,0	0,2	9,7	20,5	69,8	3,4
160,5	9618	0,0	6,9	0,0	8,0	2,4	0,0	0,0	0,0	3,6	0,0	0,0	1,4	0,8	0,1	20,0	48,2	0,1	8,5	20,8	70,7	3,4
161,5	9671	0,0	11,6	1,5	7,9	16,0	0,0	0,2	0,1	3,4	2,5	0,0	0,0	5,0	0,6	21,4	24,5	0,4	5,0	40,6	54,4	1,3
165,5	9875	0,0	2,7	0,0	5,5	8,7	0,0	0,0	0,0	3,2	0,0	0,0	1,0	0,8	0,0	24,8	40,4	0,5	12,4	20,0	67,6	3,4
170,5	10096	0,0	12,6	0,0	5,0	6,0	2,5	0,2	0,0	13,7	0,0	0,0	0,0	2,2	0,1	15,4	27,6	0,3	14,4	39,9	45,6	1,1
175,5	10259	0,0	5,5	0,0	3,8	4,6	0,0	0,0	0,0	4,4	0,0	0,0	2,1	1,9	0,3	24,9	40,9	0,5	11,2	18,3	70,5	3,9
180,5	10374	0,0	6,1	3,1	7,8	7,7	0,0	0,0	0,0	21,9	1,4	0,0	0,0	11,3	0,1	16,3	13,6	1,5	9,3	46,5	44,2	0,9
182,5	10416	0,0	2,1	0,0	3,8	4,8	0,0	0,0	0,2	3,7	0,7	0,0	0,0	1,3	0,2	52,0	23,2	0,4	7,6	14,6	77,8	5,3
183,5	10438	0,0	0,0	8,5	16,8	37,9	0,0	3,5	0,0	4,5	0,0	0,0	0,0	14,3	1,4	0,0	4,3	4,0	4,7	71,3	24,0	0,3
185,5	10485	0,0	11,1	1,8	8,9	17,0	0,0	1,8	0,3	6,3	16,0	0,0	0,0	2,8	0,4	5,1	20,9	0,6	7,1	47,2	45,7	1,0
190,5	10643	0,0	0,3	0,0	2,4	15,0	0,0	0,0	0,0	5,6	2,1	0,0	0,0	3,0	0,0	23,5	32,0	0,0	16,2	23,3	60,5	2,6
194,5	10827	0,0	0,5	0,0	13,3	6,5	0,0	0,0	0,1	13,8	0,0	0,0	0,5	0,1	0,1	21,2	18,5	0,4	24,9	34,2	40,9	1,2
195,5	10881	0,0	20,5	0,0	7,7	2,1	0,0	2,6	0,5	12,7	9,0	0,0	0,0	7,8	0,1	14,1	15,9	0,2	6,8	46,1	47,1	1,0
199,5	11122	0,0	0,0	0,0	7,2	7,6	0,0	0,0	0,0	26,4	14,5	0,0	0,0	6,3	0,0	4,4	24,5	0,1	9,0	41,2	49,8	1,2

**Tableau X-4 :** Données géochimiques moléculaires, n-alcanes, de la carotte CF02-02A, en ng.g<sup>-1</sup>

<i>Prof. (cm)</i>	<i>Âge</i>	<i>C<sub>16</sub></i>	<i>C<sub>17</sub></i>	<i>C<sub>18</sub></i>	<i>C<sub>19</sub></i>	<i>C<sub>20</sub></i>	<i>C<sub>21</sub></i>	<i>C<sub>22</sub></i>	<i>C<sub>23</sub></i>	<i>C<sub>24</sub></i>	<i>C<sub>25</sub></i>	<i>C<sub>26</sub></i>	<i>C<sub>27</sub></i>	<i>C<sub>28</sub></i>	<i>C<sub>29</sub></i>	<i>C<sub>30</sub></i>	<i>C<sub>31</sub></i>	<i>C<sub>32</sub></i>	<i>C<sub>33</sub></i>	<i>Pristane</i>	<i>Phytane</i>	<i>Pr/Ph</i>
0,5	2059	0,56	4,44	9,57	5,01	9,91	2,76	7,87	3,60	6,09	6,57	6,73	8,72	7,87	13,29	5,28	9,23	3,11	4,18	3,64	4,34	41,91
3,5	2142	0,96	0,75	20,31	2,22	20,18	5,49	13,69	5,63	9,01	11,60	8,05	9,32	6,51	11,80	3,75	8,51	2,07	4,26	0,25	1,11	11,41
4,5	2170	0,58	0,75	6,04	1,99	10,05	5,79	8,05	5,67	9,22	13,71	16,96	22,39	23,12	27,72	14,26	13,60	5,07	4,12	0,37	1,43	13,04
5,5	2198	0,19	1,31	6,54	1,49	8,54	1,26	5,91	2,05	1,91	3,10	2,57	3,46	2,58	5,49	1,61	4,28	0,68	1,51	0,63	2,59	12,09
7,5	2254	26,72	2,73	23,78	4,19	22,52	11,07	16,56	9,64	14,65	20,07	25,79	40,93	47,22	62,19	31,43	27,56	8,19	5,46	n.d.	n.d.	-
10,5	2340	6,29	8,83	13,30	2,84	8,79	1,53	5,61	2,34	2,43	4,57	3,45	5,09	4,17	9,07	2,79	6,46	1,12	2,35	3,48	7,21	24,13
15,5	2494	0,25	2,13	7,20	1,85	9,62	1,37	6,57	2,34	2,11	3,16	2,22	2,76	1,54	4,10	0,88	3,32	0,45	1,37	1,30	3,85	16,87
20,5	2668	0,36	1,68	7,49	1,73	9,93	1,53	6,92	2,46	2,44	3,67	2,74	3,21	1,85	4,86	1,22	3,89	0,59	1,72	1,06	3,23	16,44
21,5	2706	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,53	1,30	1,70	1,12	2,73	1,94	3,81	1,90	2,95	1,03	1,79	n.d.	n.d.	-
22,5	2745	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1,07	5,56	18,14	48,28	77,69	96,19	103,04	75,58	55,56	27,87	14,68	n.d.	n.d.	-
25,5	2871	2,79	4,79	10,18	3,11	8,42	2,75	6,61	2,66	1,95	3,05	2,00	2,58	1,46	4,02	0,94	3,42	0,61	1,53	2,36	5,45	21,63
30,5	3109	1,37	2,03	8,54	3,16	7,54	1,70	6,01	2,34	2,00	3,19	2,24	3,13	2,06	5,05	1,39	3,53	0,56	1,36	1,02	3,45	14,73
35,5	3376	0,14	2,05	6,71	1,81	9,00	1,57	6,47	2,77	2,56	3,84	2,81	3,75	2,60	5,97	1,78	4,53	0,73	2,01	0,90	3,76	11,93
38,5	3546	0,17	0,62	3,11	1,14	5,67	2,56	5,74	4,18	7,33	11,09	12,36	18,46	19,68	27,06	12,98	13,43	3,45	3,38	0,28	0,82	17,29
39,5	3604	0,09	0,33	1,37	1,11	5,81	3,78	9,02	9,93	17,25	25,47	30,58	36,12	35,05	43,13	21,59	19,53	6,97	3,37	0,19	0,62	15,53
40,5	3662	0,30	1,38	6,92	2,67	8,79	2,78	6,64	2,77	3,29	5,72	6,65	9,30	9,34	12,81	5,78	6,81	2,00	1,87	0,68	2,04	16,62
45,5	3954	1,58	2,70	10,45	3,64	10,64	2,67	8,13	3,44	2,86	4,44	3,25	3,88	2,37	6,11	1,83	4,81	0,76	2,04	1,00	3,46	14,38
50,5	4242	1,36	1,81	9,30	2,64	10,24	2,30	8,11	3,39	2,99	4,92	3,23	4,37	2,41	6,58	1,45	4,75	0,50	1,53	0,57	2,20	13,06
55,5	4515	0,46	1,13	7,61	1,91	10,44	2,28	8,93	3,59	3,28	5,11	3,66	4,67	2,87	7,38	1,86	5,84	1,00	2,23	0,35	1,07	16,39
60,5	4760	0,02	0,36	5,57	1,91	10,33	1,98	8,26	3,52	3,26	4,96	3,41	4,70	2,66	7,51	1,70	6,21	0,96	2,81	0,13	1,29	5,24
62,5	4848	1,42	1,07	4,89	1,24	7,58	2,17	7,75	3,54	6,52	8,78	11,37	16,62	17,84	24,07	11,37	12,68	3,70	3,26	0,26	0,61	21,03
65,5	4969	0,50	2,02	9,28	2,29	10,46	2,36	10,45	4,55	5,38	11,23	17,30	28,72	33,95	45,06	22,41	24,24	8,25	6,81	0,95	3,11	15,28
67,5	5044	2,54	6,33	13,16	3,06	9,32	2,67	7,26	4,04	7,85	18,17	35,63	65,17	88,36	115,59	64,71	55,63	21,65	11,89	2,05	5,31	19,31
69,5	5114	0,09	0,68	3,85	1,97	9,37	3,16	9,88	8,65	15,93	20,42	22,11	23,03	18,69	23,17	9,16	12,06	2,95	3,37	0,32	1,61	9,91
70,5	5148	0,38	3,12	10,60	3,44	12,41	3,20	9,80	4,40	4,47	6,43	5,42	7,29	5,26	10,96	3,17	8,05	1,61	3,24	1,33	5,38	12,41
75,5	5308	0,05	0,42	3,70	1,59	7,56	1,96	8,04	3,94	5,69	6,68	4,55	6,28	3,85	9,26	2,30	7,14	1,13	3,04	0,19	1,04	9,05
80,5	5461	0,22	0,58	6,75	2,03	12,11	2,67	11,17	4,43	4,27	6,80	4,17	7,60	6,16	13,19	4,88	9,46	3,01	3,88	0,16	1,17	6,84
85,5	5620	0,33	2,50	9,56	3,75	11,09	3,25	9,71	4,16	3,99	6,46	3,37	5,86	3,29	8,63	2,21	6,91	1,11	2,87	1,20	4,20	14,33
88,5	5724	0,90	n.d.	4,81	1,30	7,02	3,59	9,67	9,15	17,29	30,00	50,86	76,18	102,62	113,92	60,50	45,65	17,17	7,98	n.d.	0,72	-
90,5	5797	0,34	0,64	7,47	2,46	10,85	2,47	8,57	4,05	3,89	6,19	4,63	6,24	4,26	9,16	2,65	6,99	1,56	2,72	0,39	2,00	9,83
91,5	5836	0,52	1,89	5,94	2,23	10,61	4,17	10,35	10,34	19,46	34,89	52,28	77,63	97,47	109,17	55,15	40,14	15,80	6,73	0,73	1,47	24,80

# X - Annexes

94,5	5960	0,47	1,55	4,88	1,93	8,76	3,72	10,41	11,53	21,11	34,59	47,58	63,17	70,95	83,21	45,84	36,29	13,44	8,53	1,02	1,88	27,06
95,5	6004	0,15	0,89	6,28	3,02	10,74	3,92	9,71	4,41	3,58	5,54	3,07	4,87	2,97	7,05	1,97	5,40	1,02	2,22	0,42	2,09	9,96
100,5	6254	0,81	2,00	8,79	2,06	10,69	1,50	8,00	2,11	1,19	4,16	1,60	4,75	2,71	9,84	2,13	9,01	1,14	4,03	0,85	2,75	15,41
105,5	6554	1,38	3,66	9,86	2,49	10,10	0,81	8,24	1,90	0,84	3,63	1,41	4,37	3,11	8,90	2,39	7,55	1,52	3,33	1,16	4,73	12,24
108,5	6754	0,38	1,12	5,37	1,23	8,62	2,98	9,51	9,97	19,93	35,81	60,14	89,38	111,38	122,12	63,29	45,51	14,95	9,26	0,51	1,20	21,33
109,5	6823	0,12	n.d.	1,78	0,91	5,20	2,69	8,61	9,20	17,29	28,78	37,90	50,90	56,14	67,71	32,78	26,64	9,56	4,19	n.d.	0,55	-
110,5	6893	0,29	1,13	6,56	1,22	9,33	1,00	7,12	1,69	1,23	4,11	1,15	4,05	2,14	7,53	1,59	6,19	n.d.	3,47	0,61	2,21	13,86
115,5	7248	0,45	0,99	4,55	0,93	6,43	0,76	5,87	1,51	n.d.	3,38	n.d.	3,65	n.d.	n.d.	0,97	4,93	n.d.	3,14	0,60	1,13	26,63
120,5	7596	n.d.	n.d.	1,49	0,50	6,34	0,62	4,76	1,49	0,80	3,70	1,75	3,65	1,60	5,79	1,06	4,79	0,42	1,80	0,06	0,34	8,30
125,5	7914	n.d.	n.d.	1,06	0,71	6,25	0,68	6,18	1,85	1,29	5,06	2,38	5,33	3,28	8,42	2,03	6,38	0,96	2,68	0,03	0,37	4,14
128,5	8082	0,41	0,49	2,59	0,94	5,91	2,33	6,45	3,53	6,92	12,63	10,71	13,49	9,86	15,33	5,55	9,84	2,45	3,71	0,16	0,48	16,60
130,5	8184	n.d.	0,16	1,88	0,54	4,59	0,81	5,20	1,60	1,29	3,77	1,45	3,61	2,10	5,94	1,41	4,40	0,78	1,62	0,10	0,80	6,17
134,5	8371	1,93	1,17	7,26	1,83	8,70	1,98	7,02	3,53	2,77	5,95	4,99	8,20	6,41	11,69	3,90	5,77	1,12	1,93	0,37	1,28	14,57
135,5	8415	0,04	0,38	5,39	1,05	8,66	0,66	6,51	2,35	2,21	6,36	4,69	7,62	4,83	9,99	2,76	6,94	1,06	3,58	0,28	1,38	10,30
140,5	8627	0,48	1,16	8,00	1,44	10,17	0,90	6,95	2,36	1,96	5,96	3,68	6,37	3,71	8,56	2,10	5,84	0,78	3,04	0,80	1,92	20,73
145,5	8842	0,05	0,40	5,53	0,98	9,22	0,70	6,03	2,22	2,17	6,22	4,51	7,42	4,53	9,00	2,56	5,65	0,92	2,69	0,30	1,41	10,66
149,5	9030	0,69	0,51	2,75	0,85	5,34	1,69	5,88	3,35	3,48	6,40	3,91	7,29	4,46	8,17	2,41	5,59	1,59	2,94	0,15	0,43	17,15
150,5	9080	0,17	0,92	6,73	1,33	8,33	0,79	6,45	3,26	4,14	9,30	8,91	11,98	9,29	13,74	5,18	7,31	1,78	3,01	0,63	2,00	15,88
154,5	9291	0,88	0,75	3,28	1,31	7,58	2,08	6,84	3,81	4,07	9,80	11,41	15,83	12,25	15,59	6,11	7,96	2,48	2,71	0,14	0,65	11,07
155,5	9346	0,09	0,88	5,12	1,29	8,65	0,88	7,36	2,59	1,95	6,57	3,82	7,10	5,24	8,96	2,70	5,45	1,15	2,51	0,48	2,08	11,51
160,5	9618	0,02	0,62	4,90	2,40	8,32	1,01	6,29	1,77	0,77	4,40	0,99	4,04	1,81	5,84	1,31	4,48	0,58	2,34	0,25	2,42	5,12
161,5	9671	0,12	0,46	1,37	1,13	5,93	2,02	7,37	3,22	3,75	8,65	7,90	11,23	7,65	10,85	4,22	5,86	1,45	2,60	0,11	0,51	10,74
165,5	9875	n.d.	0,25	3,73	2,49	6,52	1,10	6,08	1,99	1,55	4,81	2,96	5,14	3,20	6,92	2,55	4,89	1,14	2,27	0,14	1,98	3,54
170,5	10096	0,11	0,31	4,73	2,28	8,83	2,59	8,07	3,80	5,24	9,69	10,44	12,89	11,23	14,24	5,80	6,80	1,61	2,54	0,13	1,07	5,97
175,5	10259	0,26	1,31	4,72	2,06	4,37	2,16	9,28	16,90	33,45	54,46	89,05	109,76	118,72	114,10	91,52	60,02	30,70	14,93	0,55	2,41	11,48
180,5	10374	n.d.	0,30	3,13	1,00	7,09	0,74	5,92	1,58	2,05	5,98	6,01	9,01	7,46	10,41	4,41	6,29	2,11	2,73	0,21	1,37	7,72
182,5	10416	0,12	0,43	1,56	1,59	6,36	3,35	7,07	3,40	3,22	5,75	3,77	5,20	3,22	6,15	2,09	4,17	1,15	1,81	0,07	0,56	6,01
183,5	10438	0,12	0,44	0,79	0,65	3,23	2,33	6,09	3,16	3,39	6,17	3,63	5,50	2,88	5,81	1,80	3,76	0,77	1,61	0,10	0,25	18,87
185,5	10485	0,04	2,02	7,55	4,87	7,95	2,37	6,31	1,94	1,92	4,77	2,20	4,62	2,78	6,06	1,59	4,07	0,66	1,98	0,85	4,98	8,54
190,5	10643	1,08	7,90	23,21	12,80	16,37	2,60	9,56	2,33	1,56	4,87	2,46	4,92	2,88	5,73	1,51	3,80	0,53	1,94	2,89	13,62	10,61
194,5	10827	15,75	29,35	31,98	7,47	25,20	4,07	18,51	4,70	2,96	6,77	3,66	6,91	4,52	9,34	3,00	6,04	1,36	2,72	14,56	15,78	46,12
195,5	10881	0,01	0,02	0,02	0,02	0,08	n.d.	0,11	0,07	0,11	0,31	0,43	1,64	1,57	3,73	1,68	2,69	0,78	1,20	0,02	0,01	83,00
199,5	11122	0,28	0,60	1,46	1,09	8,04	2,57	10,35	3,43	3,05	4,96	5,03	8,38	6,85	10,13	3,92	6,23	1,58	3,24	0,13	0,39	16,42
213,5	12093	0,22	0,57	0,98	0,78	5,29	2,07	9,61	2,96	2,39	3,15	1,93	3,60	1,63	5,19	1,83	3,29	0,97	1,50	0,12	0,31	20,11
226,5	12774	1,02	2,08	6,52	2,79	10,47	7,04	13,43	12,33	19,70	32,81	32,96	31,03	26,30	33,59	17,41	16,94	7,10	0,44	0,62	1,89	16,31

# X - Annexes

**Tableau X-5 :** Données géochimiques moléculaires, sommes et percentuels des n-alcanes, de la carotte CF02-02A, en ng.g<sup>-1</sup>

<i>Prof. (cm)</i>	<i>Âge</i>	<i>S(curtos)</i>	<i>%</i>	<i>S (C16-22)</i>	<i>%</i>	<i>S (C17-23)</i>	<i>%</i>	<i>S(longos)</i>	<i>%</i>	<i>S (C24-32)</i>	<i>%</i>	<i>S (C25-33)</i>	<i>%</i>	<i>S totale</i>
0,5	2059	43,72	38,1	27,91	63,8	15,81	36,2	71,07	61,9	29,08	40,9	41,99	59,1	114,78
3,5	2142	69,23	48,0	55,14	79,6	14,09	20,4	74,86	52,0	29,38	39,2	45,48	60,8	144,09
4,5	2170	38,92	20,6	24,71	63,5	14,21	36,5	150,16	79,4	68,62	45,7	81,53	54,3	189,08
5,5	2198	27,30	50,1	21,18	77,6	6,11	22,4	27,19	49,9	9,35	34,4	17,84	65,6	54,49
7,5	2254	117,21	29,3	89,58	76,4	27,63	23,6	283,50	70,7	127,28	44,9	156,21	55,1	400,70
10,5	2340	49,53	54,4	34,00	68,6	15,53	31,4	41,50	45,6	13,96	33,6	27,54	66,4	91,03
15,5	2494	31,33	58,8	23,64	75,5	7,68	24,5	21,91	41,2	7,19	32,8	14,72	67,2	53,24
20,5	2668	32,10	55,1	24,69	76,9	7,41	23,1	26,20	44,9	8,84	33,7	17,36	66,3	58,30
21,5	2706	0,53	2,5	0,00	0,0	0,53	100,0	20,28	97,5	7,30	36,0	12,98	64,0	20,81
22,5	2745	1,07	0,2	0,00	0,0	1,07	100,0	522,59	99,8	253,48	48,5	269,11	51,5	523,66
25,5	2871	41,31	65,7	28,00	67,8	13,31	32,2	21,57	34,3	6,96	32,3	14,61	67,7	62,88
30,5	3109	32,70	57,1	23,46	71,8	9,24	28,2	24,52	42,9	8,25	33,6	16,27	66,4	57,22
35,5	3376	30,51	49,9	22,31	73,1	8,20	26,9	30,58	50,1	10,48	34,3	20,09	65,7	61,09
38,5	3546	23,20	15,2	14,69	63,3	8,51	36,7	129,23	84,8	55,80	43,2	73,42	56,8	152,42
39,5	3604	31,44	11,6	16,29	51,8	15,15	48,2	239,07	88,4	111,44	46,6	127,62	53,4	270,51
40,5	3662	32,25	33,7	22,65	70,2	9,60	29,8	63,57	66,3	27,05	42,6	36,52	57,4	95,82
45,5	3954	43,25	57,2	30,80	71,2	12,45	28,8	32,33	42,8	11,06	34,2	21,27	65,8	75,59
50,5	4242	39,15	54,5	29,01	74,1	10,14	25,9	32,72	45,5	10,57	32,3	22,15	67,7	71,87
55,5	4515	36,34	48,9	27,43	75,5	8,91	24,5	37,90	51,1	12,68	33,5	25,22	66,5	74,24
60,5	4760	31,95	45,6	24,18	75,7	7,78	24,3	38,19	54,4	11,99	31,4	26,19	68,6	70,14
62,5	4848	29,67	20,3	21,65	73,0	8,02	27,0	116,20	79,7	50,79	43,7	65,41	56,3	145,87
65,5	4969	41,92	17,1	30,70	73,2	11,22	26,8	203,33	82,9	87,27	42,9	116,06	57,1	245,25
67,5	5044	48,38	9,1	32,28	66,7	16,09	33,3	484,63	90,9	218,19	45,0	266,44	55,0	533,01
69,5	5114	37,66	20,0	23,20	61,6	14,46	38,4	150,88	80,0	68,83	45,6	82,05	54,4	188,54
70,5	5148	47,36	45,9	33,19	70,1	14,16	29,9	55,92	54,1	19,94	35,7	35,98	64,3	103,27
75,5	5308	27,27	35,3	19,35	71,0	7,91	29,0	49,91	64,7	17,52	35,1	32,40	64,9	77,18
80,5	5461	39,94	38,6	30,24	75,7	9,70	24,3	63,41	61,4	22,49	35,5	40,92	64,5	103,35
85,5	5620	44,36	49,8	30,70	69,2	13,66	30,8	44,68	50,2	13,96	31,2	30,72	68,8	89,04
88,5	5724	36,45	6,5	22,41	61,5	14,04	38,5	522,16	93,5	248,43	47,6	273,73	52,4	558,61
90,5	5797	36,85	43,3	27,22	73,9	9,63	26,1	48,28	56,7	16,99	35,2	31,30	64,8	85,14
91,5	5836	46,05	8,3	27,42	59,6	18,62	40,4	508,73	91,7	240,16	47,2	268,57	52,8	554,77

# X - Annexes

94,5	5960	43,25	9,2	24,52	56,7	18,73	43,3	424,71	90,8	198,93	46,8	225,79	53,2	467,96
95,5	6004	39,13	50,9	26,88	68,7	12,25	31,3	37,71	49,1	12,63	33,5	25,08	66,5	76,84
100,5	6254	35,95	47,0	28,28	78,7	7,67	21,3	40,57	53,0	8,78	21,6	31,79	78,4	76,52
105,5	6554	38,45	50,9	29,58	76,9	8,86	23,1	37,06	49,1	9,28	25,0	27,78	75,0	75,51
108,5	6754	39,16	6,4	23,87	61,0	15,29	39,0	571,76	93,6	269,68	47,2	302,08	52,8	610,92
109,5	6823	28,51	7,9	15,71	55,1	12,80	44,9	331,89	92,1	153,67	46,3	178,22	53,7	360,40
110,5	6893	28,34	47,4	23,30	82,2	5,04	17,8	31,47	52,6	6,11	19,4	25,36	80,6	59,80
115,5	7248	21,49	57,2	17,30	80,5	4,19	19,5	16,07	42,8	0,97	6,0	15,11	94,0	37,57
120,5	7596	15,20	37,5	12,59	82,9	2,61	17,1	25,36	62,5	5,63	22,2	19,73	77,8	40,56
125,5	7914	16,74	30,7	13,50	80,6	3,24	19,4	37,82	69,3	9,95	26,3	27,87	73,7	54,56
128,5	8082	22,64	20,0	15,36	67,8	7,28	32,2	90,50	80,0	35,50	39,2	55,01	60,8	113,14
130,5	8184	14,78	35,9	11,68	79,0	3,11	21,0	26,37	64,1	7,03	26,7	19,34	73,3	41,16
134,5	8371	33,42	38,8	24,91	74,5	8,51	25,5	52,72	61,2	19,18	36,4	33,54	63,6	86,14
135,5	8415	25,03	33,3	20,59	82,3	4,44	17,7	50,04	66,7	15,54	31,1	34,49	68,9	75,07
140,5	8627	31,46	42,8	25,59	81,3	5,87	18,7	42,00	57,2	12,23	29,1	29,77	70,9	73,47
145,5	8842	25,13	35,5	20,83	82,9	4,30	17,1	45,66	64,5	14,69	32,2	30,98	67,8	70,79
149,5	9030	21,05	31,3	14,66	69,6	6,40	30,4	46,25	68,7	15,85	34,3	30,40	65,7	67,30
150,5	9080	27,98	27,3	21,68	77,5	6,30	22,5	74,63	72,7	29,29	39,2	45,34	60,8	102,61
154,5	9291	26,54	23,1	18,58	70,0	7,96	30,0	88,21	76,9	36,33	41,2	51,88	58,8	114,74
155,5	9346	26,86	37,1	21,21	79,0	5,65	21,0	45,45	62,9	14,86	32,7	30,59	67,3	72,31
160,5	9618	25,32	48,8	19,53	77,1	5,79	22,9	26,56	51,2	5,47	20,6	21,10	79,4	51,88
161,5	9671	21,62	25,2	14,79	68,4	6,83	31,6	64,15	74,8	24,96	38,9	39,18	61,1	85,77
165,5	9875	22,17	38,5	16,34	73,7	5,83	26,3	35,44	61,5	11,40	32,2	24,04	67,8	57,60
170,5	10096	30,72	27,6	21,74	70,8	8,98	29,2	80,47	72,4	34,31	42,6	46,16	57,4	111,19
175,5	10259	41,08	5,4	18,64	45,4	22,44	54,6	716,71	94,6	363,44	50,7	353,27	49,3	757,79
180,5	10374	19,76	25,9	16,14	81,7	3,62	18,3	56,46	74,1	22,04	39,0	34,42	61,0	76,23
182,5	10416	23,87	39,5	15,11	63,3	8,77	36,7	36,53	60,5	13,44	36,8	23,09	63,2	60,41
183,5	10438	16,81	32,2	10,23	60,9	6,58	39,1	35,32	67,8	12,47	35,3	22,85	64,7	52,13
185,5	10485	33,04	51,9	21,85	66,1	11,20	33,9	30,65	48,1	9,15	29,8	21,50	70,2	63,69
190,5	10643	75,84	71,5	50,22	66,2	25,62	33,8	30,18	28,5	8,93	29,6	21,25	70,4	106,02
194,5	10827	137,03	74,3	91,44	66,7	45,60	33,3	47,28	25,7	15,50	32,8	31,78	67,2	184,32
195,5	10881	0,34	2,3	0,22	65,8	0,12	34,2	14,15	97,7	4,58	32,3	9,57	67,7	14,49
199,5	11122	27,81	34,3	20,13	72,4	7,69	27,6	53,38	65,7	20,44	38,3	32,95	61,7	81,20
213,5	12093	22,49	46,9	16,11	71,6	6,39	28,4	25,49	53,1	8,76	34,4	16,73	65,6	47,99
226,5	12774	55,68	20,3	31,44	56,5	24,24	43,5	218,27	79,7	103,47	47,4	114,80	52,6	273,95

**Tableau X-6 :** Données géochimiques moléculaires, alcenones, de la carotte CF02-02A

<i>Profondeur (cm)</i>	<i>Âge (ans cal BP)</i>	<i><math>U'_{k37}</math></i>	<i>Température (°C)</i>
0,5	2059	0,89	25,7
4,5	2170	0,90	26,0
5,5	2198	0,89	25,7
7,5	2254	0,92	26,4
10,5	2340	0,88	25,4
15,5	2494	0,90	26,0
20,5	2668	0,90	25,9
21,5	2706	0,94	27,3
22,5	2745	0,92	26,5
25,5	2871	0,87	25,2
30,5	3109	0,86	24,6
35,5	3376	0,90	26,0
38,5	3546	0,91	26,1
39,5	3604	0,93	26,8
40,5	3662	0,87	25,0
45,5	3954	0,90	25,8
50,5	4242	0,88	25,5
55,5	4515	0,91	26,2
60,5	4760	0,90	25,8
62,5	4848	0,91	26,3
65,5	4969	0,90	26,1
67,5	5044	0,91	26,3
69,5	5114	0,89	25,7
70,5	5148	0,89	25,7
75,5	5308	0,89	25,6
80,5	5461	0,92	26,5
85,5	5620	0,95	27,3
88,5	5724	0,91	26,3
90,5	5797	0,93	26,9
91,5	5836	0,90	26,0
94,5	5960	0,91	26,4
95,5	6004	0,92	26,6
100,5	6254	0,86	24,8
105,5	6554	0,85	24,5
108,5	6754	0,90	26,0
109,5	6823	0,89	25,6
110,5	6893	0,86	24,7
115,5	7248	0,84	24,2
120,5	7596	0,96	27,6
125,5	7914	0,94	27,3
128,5	8082	0,95	27,5
130,5	8184	0,90	25,9
134,5	8371	0,91	26,1
135,5	8415	0,85	24,3
140,5	8627	0,86	24,7
145,5	8842	0,85	24,5
149,5	9030	0,95	27,5

## X - Annexes

150,5	9080	0,91	26,3
154,5	9291	0,89	25,8
155,5	9346	0,93	26,8
160,5	9618	0,88	25,3
161,5	9671	0,90	25,8
165,5	9875	0,87	25,0
170,5	10096	0,88	25,4
175,5	10259	0,88	25,3
180,5	10374	0,88	25,3
182,5	10416	0,87	25,2
183,5	10438	0,91	26,3
185,5	10485	0,97	28,1
190,5	10643	0,87	25,0
194,5	10827	0,88	25,4
195,5	10881	0,91	26,3
199,5	11122	0,95	27,4

## X.2.1. – Site Pacifique sud-est

Tableau X-7 : Données chronologiques et lithologiques de la carotte B13

<i>Profondeur (cm)</i>	<i>Âge (ans cal BP)</i>	<i>Taux de sédimentation (cm.an<sup>-1</sup>)</i>	<i>Résolution temporelle (ans.cm<sup>-1</sup>)</i>	<i>Densité (g.cm<sup>-3</sup>)</i>	<i>Niveau de gris (Valeur)</i>
0,5	864	0,082	12	0,236	5938
1,5	876	0,082	12	0,356	6042
2,5	888	0,082	12	0,218	5953
3,5	900	0,082	12	0,260	6064
4,5	913	0,082	12	0,236	6021
5,5	925	0,082	12	0,259	5997
6,5	937	0,082	12	0,248	5957
7,5	949	0,082	12	0,286	5941
8,5	961	0,082	12	0,256	5910
9,5	973	0,082	12	0,241	5891
10,5	986	0,082	12	0,257	5825
11,5	998	0,082	12	0,215	5840
12,5	1010	0,082	12	0,212	5808
13,5	1022	0,082	12	0,243	5811
14,5	1034	0,082	12	0,279	5838
15,5	1046	0,082	12	0,118	5793
16,5	1058	0,082	12	0,197	5783
17,5	1071	0,082	12	0,233	5763
18,5	1083	0,082	12	0,196	5768
19,5	1095	0,082	12	0,177	5745
20,5	1107	0,082	12	0,142	5689
21,5	1119	0,082	12	0,163	5640
22,5	1131	0,082	12	0,128	5690
23,5	1144	0,082	12	0,261	5637
24,5	1156	0,082	12	0,142	5632
25,5	1168	0,082	12	0,134	5614
26,5	1180	0,082	12	0,130	5629
27,5	1192	0,082	12	0,151	5649
28,5	1204	0,082	12	0,144	5677
29,5	1216	0,082	12	0,223	5783
30,5	1229	0,082	12	0,191	5793
31,5	1241	0,082	12	0,240	5776
32,5	1253	0,082	12	0,206	5797
33,5	1265	0,082	12	0,272	5771
34,5	1277	0,082	12	0,263	5833
35,5	1289	0,082	12	0,264	5818
36,5	1301	0,082	12	0,327	5857
37,5	1314	0,082	12	0,276	5878
38,5	1326	0,082	12	0,291	5883
39,5	1338	0,082	12	0,272	5876
40,5	1350	0,082	12	0,318	5856
41,5	1362	0,082	12	0,290	5947
42,5	1374	0,082	12	0,256	5903
43,5	1387	0,082	12	0,323	5903



## X - Annexes

44,5	1399	0,082	12	0,237	5833
45,5	1411	0,082	12	0,245	5803
46,5	1423	0,082	12	0,212	5840
47,5	1435	0,082	12	0,225	5769
48,5	1447	0,082	12	0,205	5779
49,5	1459	0,082	12	0,192	5818
50,5	1472	0,082	12	0,159	5796
51,5	1484			0,176	5690
52,5	1496	0,160	6	0,255	5764
53,5	1503	0,160	6	0,230	5760
54,5	1509	0,160	6	0,196	5793
55,5	1515	0,160	6	0,128	5769
56,5	1521	0,160	6	0,219	5714
57,5	1528	0,160	6	0,209	5721
58,5	1534	0,160	6	0,191	5805
59,5	1540	0,160	6	0,182	5775
60,5	1546	0,160	6	0,169	5900
61,5	1553	0,160	6	0,175	5829
62,5	1559	0,160	6	0,276	5819
63,5	1565	0,160	6	0,170	5924
64,5	1571	0,160	6	0,137	5878
65,5	1578	0,160	6	0,177	5847
66,5	1584	0,160	6	0,169	5630
67,5	1590	0,160	6	0,177	5703
68,5	1596	0,160	6	0,255	5800
69,5	1603	0,160	6	0,344	5864
70,5	1609	0,160	6	0,295	5898
71,5	1615	0,160	6	0,239	5805
72,5	1621	0,160	6	0,276	5811
73,5	1628	0,160	6	0,212	5784
74,5	1634	0,160	6	0,211	5759
75,5	1640	0,160	6	0,264	5731
76,5	1646	0,160	6	0,285	5830
77,5	1653	0,160	6	0,296	5816
78,5	1659	0,160	6	0,276	5781
79,5	1665	0,160	6	0,194	5789
80,5	1671	0,160	6	0,268	5729
81,5	1678	0,160	6	0,149	5727
82,5	1684	0,160	6	0,170	5646
83,5	1690			0,202	5651
84,5	1686	0,190	5	0,349	5768
85,5	1691	0,190	5	0,305	5924
86,5	1697	0,190	5	0,360	5914
87,5	1702	0,190	5	0,309	5906
88,5	1707	0,190	5	0,322	5857
89,5	1712	0,190	5	0,302	5811
90,5	1718	0,190	5	0,241	5789
91,5	1723	0,190	5	0,255	5766
92,5	1728	0,190	5	0,204	5727
93,5	1734	0,190	5	0,183	5669
94,5	1739	0,190	5	0,149	5652
95,5	1744	0,190	5	0,183	5654

## X - Annexes

96,5	1749	0,190	5	0,216	5748
97,5	1755	0,190	5	0,230	5735
98,5	1760	0,190	5	0,232	5753
99,5	1765	0,190	5	0,171	5739
100,5	1770	0,190	5	0,156	5657
101,5	1776	0,190	5	0,182	5676
102,5	1781	0,190	5	0,194	5698
103,5	1786	0,190	5	0,173	5701
104,5	1791	0,190	5	0,139	5629
105,5	1797	0,190	5	0,195	5685
106,5	1802	0,190	5	0,139	5616
107,5	1807	0,190	5	0,142	5605
108,5	1812	0,190	5	0,140	5603
109,5	1818	0,190	5	0,147	5615
110,5	1823	0,190	5	0,173	5655
111,5	1828	0,190	5	0,148	5651
112,5	1834	0,190	5	0,216	5656
113,5	1839	0,190	5	0,387	5886
114,5	1844	0,190	5	0,359	5923
115,5	1849	0,190	5	0,292	5811
116,5	1855	0,190	5	0,311	5770
117,5	1860	0,190	5	0,284	5850
118,5	1865	0,190	5	0,253	5806
119,5	1870	0,190	5	0,239	5754
120,5	1876	0,190	5	0,212	5792
121,5	1881	0,190	5	0,226	5740
122,5	1886	0,190	5	0,225	5771
123,5	1891	0,190	5	0,199	5771
124,5	1897	0,190	5	0,251	5756
125,5	1902	0,190	5	0,187	5797
126,5	1907	0,190	5	0,253	5733
127,5	1912	0,190	5	0,213	5774
128,5	1918	0,190	5	0,226	5789
129,5	1923	0,190	5	0,223	5800
130,5	1928	0,190	5	0,189	5745
131,5	1934	0,190	5	0,253	5730
132,5	1939	0,190	5	0,272	5821
133,5	1944	0,190	5	0,336	5855
134,5	1949	0,190	5	0,334	5912
135,5	1955	0,190	5	0,331	5902
136,5	1960	0,190	5	0,276	5879
137,5	1965	0,190	5	0,279	5840
138,5	1970	0,190	5	0,300	5850
139,5	1976	0,190	5	0,248	5861
140,5	1981	0,190	5	0,220	5775
141,5	1986	0,190	5	0,263	5791
142,5	1991	0,190	5	0,256	5814
143,5	1997	0,190	5	0,289	5834
144,5	2002	0,190	5	0,278	5832
145,5	2007	0,190	5	0,267	5832
146,5	2012	0,190	5	0,206	5768
147,5	2018	0,190	5	0,236	5802

## X - Annexes

148,5	2023	0,190	5	0,274	5867
149,5	2028	0,190	5	0,229	5856
150,5	2034	0,190	5	0,331	5852
151,5	2039	0,190	5	0,326	5917
152,5	2044	0,190	5	0,352	5918
153,5	2049	0,190	5	0,282	5888
154,5	2055	0,190	5	0,232	5841
155,5	2060	0,190	5	0,325	5846
156,5	2065	0,190	5	0,278	6011
157,5	2070	0,190	5		6167
158,5	2076	0,190	5	0,369	5790
159,5	2081	0,190	5	0,206	5940
160,5	2086	0,190	5	0,247	5843
161,5	2091	0,190	5	0,280	5925
162,5	2097	0,190	5	0,338	5985
163,5	2102	0,190	5	0,354	5969
164,5	2107	0,190	5	0,376	5990
165,5	2112	0,190	5	0,356	6014
166,5	2118	0,190	5	0,356	5963
167,5	2123	0,190	5	0,269	5988
168,5	2128	0,190	5	0,180	5953
169,5	2134	0,190	5	0,295	5826
170,5	2153			0,313	5803
171,5	2166	0,076	13	0,222	5887
172,5	2179	0,076	13	0,211	5815
173,5	2192	0,076	13	0,249	5725
174,5	2205	0,076	13	0,239	5757
175,5	2218	0,076	13	0,230	5759
176,5	2232	0,076	13	0,282	5800
177,5	2245	0,076	13	0,313	5795
178,5	2258	0,076	13	0,384	5843
179,5	2271	0,076	13	0,387	5893
180,5	2284	0,076	13	0,416	5960
181,5	2297	0,076	13	0,450	5962
182,5	2310	0,076	13	0,407	5987
183,5	2323	0,076	13	0,388	5966
184,5	2337	0,076	13	0,370	5894
185,5	2350	0,076	13	0,380	5935
186,5	2363	0,076	13	0,294	5920
187,5	2376	0,076	13	0,269	5856
188,5	2389	0,076	13	0,342	5829
189,5	2402	0,076	13	0,367	5818
190,5	2415	0,076	13	0,313	5967
191,5	2428	0,076	13	0,203	5891
192,5	2442	0,076	13	0,213	5743
193,5	2455	0,076	13	0,366	5741
194,5	2468	0,076	13	0,413	5861
195,5	2481	0,076	13	0,294	5959
196,5	2494	0,076	13	0,345	5959
197,5	2507	0,076	13	0,382	5925
198,5	2520	0,076	13	0,284	5967
199,5	2533	0,076	13	0,449	5898

## X - Annexes

200,5	2547	0,076	13	0,365	5992
201,5	2560	0,076	13	0,318	6042
202,5	2573	0,076	13	0,330	5876
203,5	2586	0,076	13	0,319	5913
204,5	2599	0,076	13	0,303	5914
205,5	2612	0,076	13	0,557	5900
206,5	2625	0,076	13	0,360	6081
207,5	2638	0,076	13	0,352	6021
208,5	2652	0,076	13	0,366	5936
209,5	2665	0,076	13	0,396	5966
210,5	2678	0,076	13	0,483	5949
211,5	2691	0,076	13	0,656	6076
212,5	2704	0,076	13	0,608	6186
213,5	2717	0,076	13	0,545	6165
214,5	2730	0,076	13	0,487	6228
215,5	2743	0,076	13	0,535	6168
216,5	2757	0,076	13	0,484	6151
217,5	2770	0,076	13	0,609	6148
218,5	2783	0,076	13	0,606	6255
219,5	2796	0,076	13	0,372	6411
220,5	2809	0,076	13	0,473	6228
221,5	2822	0,076	13	0,772	6056
222,5	2835	0,076	13	0,851	6228
223,5	2848	0,076	13	0,897	6614
224,5	2862	0,076	13	1,073	6668
225,5	2875	0,076	13	1,056	6653
226,5	2888	0,076	13	0,807	6677
227,5	2901	0,076	13	0,831	6386
228,5	2914	0,076	13	0,753	6372
229,5	2927	0,076	13	0,644	6315
230,5	2940	0,076	13	0,843	6580
231,5	2953	0,076	13	1,087	6778
232,5	2967	0,076	13	0,928	6795
233,5	2980	0,076	13	0,816	6818
234,5	2993	0,076	13	1,173	6805
235,5	3006	0,076	13	0,938	6788
236,5	3019	0,076	13	0,958	6716
237,5	3032	0,076	13	0,784	6645
238,5	3045	0,076	13	0,946	6535
239,5	3058			0,359	6297
240,5	9048	0,065	15	0,374	6087
241,5	9063	0,065	15	0,537	6064
242,5	9079	0,065	15	0,503	6174
243,5	9094	0,065	15	0,495	6206
244,5	9110	0,065	15	0,573	6206
245,5	9125	0,065	15	0,466	6188
246,5	9140	0,065	15	0,429	6187
247,5	9156	0,065	15	0,409	6141
248,5	9171	0,065	15	0,393	6143
249,5	9186	0,065	15	0,437	6092
250,5	9202	0,065	15	0,463	6129
251,5	9217	0,065	15	0,461	6174

## X - Annexes

252,5	9232	0,065	15	0,523	6211
253,5	9248	0,065	15	0,491	6194
254,5	9263	0,065	15	0,385	6172
255,5	9278	0,065	15	0,325	6109
256,5	9294	0,065	15	0,358	6027
257,5	9309	0,065	15		5881
258,5	9325	0,065	15	0,475	6093
259,5	9340	0,065	15	0,488	5990
260,5	9355	0,065	15	0,349	6382
261,5	9371	0,065	15	0,509	6301
262,5	9386	0,065	15	0,526	6146
263,5	9401	0,065	15	0,420	6307
264,5	9417	0,065	15	0,475	6352
265,5	9432	0,065	15	0,421	6265
266,5	9447	0,065	15	0,414	6217
267,5	9463	0,065	15	0,474	6251
268,5	9478	0,065	15	0,519	6245
269,5	9494	0,065	15	0,502	6257
270,5	9509	0,065	15	0,396	6312
271,5	9524	0,065	15	0,413	6293
272,5	9540	0,065	15	0,445	6277
273,5	9555	0,065	15	0,436	6217
274,5	9570	0,065	15	0,542	6227
275,5	9586	0,065	15	0,515	6278
276,5	9601	0,065	15	0,450	6257
277,5	9616	0,065	15	0,439	6260
278,5	9632	0,065	15	0,307	6254
279,5	9647	0,065	15	0,542	6168
280,5	9663	0,065	15	0,432	6060
281,5	9678	0,065	15	0,406	6000
282,5	9693	0,065	15	0,487	6224
283,5	9709	0,065	15	0,473	6203
284,5	9724	0,065	15	0,468	6237
285,5	9739	0,065	15	0,424	6236
286,5	9755	0,065	15	0,532	6255
287,5	9770	0,065	15	0,497	6242
288,5	9785	0,065	15	0,457	6294
289,5	9801	0,065	15	0,479	6283
290,5	9816	0,065	15	0,547	6287
291,5	9831	0,065	15	0,446	6354
292,5	9847	0,065	15	0,354	6218
293,5	9862	0,065	15	0,345	6169
294,5	9878	0,065	15	0,418	6129
295,5	9893	0,065	15	0,456	6167
296,5	9908	0,065	15	0,493	6176
297,5	9924	0,065	15	0,437	6230
298,5	9939	0,065	15	0,372	6221
299,5	9954	0,065	15	0,357	6134
300,5	9970	0,065	15	0,457	6140
301,5	9985	0,065	15	0,532	6133
302,5	10000	0,065	15	0,468	6223
303,5	10016	0,065	15	0,571	6211

## X - Annexes

304,5	10031	0,065	15	0,356	6200
305,5	10047	0,065	15	0,613	6213
306,5	10062	0,065	15	0,448	6247
307,5	10077	0,065	15	0,397	6251
308,5	10093	0,065	15	0,446	6230
309,5	10108	0,065	15	0,447	6285
310,5	10123	0,065	15	0,427	6317
311,5	10139	0,065	15	0,451	6282
312,5	10154	0,065	15	0,429	6248
313,5	10169	0,065	15	0,479	6250
314,5	10185	0,065	15	0,511	6294
315,5	10200	0,065	15	0,427	6321
316,5	10216	0,065	15	0,544	6283
317,5	10231	0,065	15	0,486	6272
318,5	10246	0,065	15	0,372	6290
319,5	10262	0,065	15	0,462	6139
320,5	10277	0,065	15	0,440	6287
321,5	10292	0,065	15	0,506	6304
322,5	10308	0,065	15	0,481	6256
323,5	10323	0,065	15	0,477	6284
324,5	10338	0,065	15	0,474	6324
325,5	10354	0,065	15	0,458	6290
326,5	10369	0,065	15	0,461	6251
327,5	10384	0,065	15	0,462	6294
328,5	10400	0,065	15	0,431	6273
329,5	10415	0,065	15	0,435	6282
330,5	10431	0,065	15	0,352	6280
331,5	10446	0,065	15	0,397	6253
332,5	10461	0,065	15	0,451	6211
333,5	10477	0,065	15	0,502	6169
334,5	10492	0,065	15	0,516	6238
335,5	10507	0,065	15	0,497	6272
336,5	10523	0,065	15	0,519	6239
337,5	10538	0,065	15	0,451	6256
338,5	10553	0,065	15	0,445	6277
339,5	10569	0,065	15	0,497	6248
340,5	10584	0,065	15	0,463	6263
341,5	10600	0,065	15	0,439	6271
342,5	10615	0,065	15	0,427	6263
343,5	10630	0,065	15	0,429	6254
344,5	10646	0,065	15	0,415	6244
345,5	10661	0,065	15	0,424	6250
346,5	10676	0,065	15	0,418	6259
347,5	10692	0,065	15	0,439	6260
348,5	10707	0,065	15	0,431	6266
349,5	10722	0,065	15	0,386	6300
350,5	10738	0,065	15	0,411	6274
351,5	10753	0,065	15	0,431	6269
352,5	10769	0,065	15	0,394	6265
353,5	10784	0,065	15	0,433	6304
354,5	10799	0,065	15	0,421	6295
355,5	10815	0,065	15	0,443	6272

## X - Annexes

356,5	10830	0,065	15	0,441	6273
357,5	10845	0,065	15	0,433	6228
358,5	10861	0,065	15	0,387	6266
359,5	10876	0,065	15	0,475	6295
360,5	10891	0,065	15	0,441	6043
361,5	10907	0,065	15	0,482	6368
362,5	10922	0,065	15	0,477	6234
363,5	10937	0,065	15	0,582	6259
364,5	10953	0,065	15	0,624	6230
365,5	10968	0,065	15	0,534	6266
366,5	10984	0,065	15	0,421	6254
367,5	10999	0,065	15	0,497	6271
368,5	11014	0,065	15	0,541	6121
369,5	11030	0,065	15	0,530	6215
370,5	11045	0,065	15	0,477	6228
371,5	11060	0,065	15	0,501	6238
372,5	11076	0,065	15	0,551	6238
373,5	11091	0,065	15	0,584	6218
374,5	11106	0,065	15	0,530	6255
375,5	11122	0,065	15	0,568	6280
376,5	11137	0,065	15	0,511	6274
377,5	11153	0,065	15	0,580	6263
378,5	11168	0,065	15	0,713	6253
379,5	11183	0,065	15	0,839	6377
380,5	11199	0,065	15	0,729	6627
381,5	11214	0,065	15	0,583	6610
382,5	11229	0,065	15	0,357	6560
383,5	11245	0,065	15	0,355	6309
384,5	11260	0,065	15	0,419	6140
385,5	11275	0,065	15	0,419	5992
386,5	11291	0,065	15	0,287	5920
387,5	11306	0,065	15	0,415	5928
388,5	11322	0,065	15	0,505	5891
389,5	11337	0,065	15	0,509	6097
390,5	11352	0,065	15	0,478	6194
391,5	11368	0,065	15	0,516	6245
392,5	11383	0,065	15	0,594	6287
393,5	11398	0,065	15	0,670	6284
394,5	11414	0,065	15	0,618	6268
395,5	11429	0,065	15	0,623	6320
396,5	11444	0,065	15	0,588	6312
397,5	11460	0,065	15	0,591	6337
398,5	11475	0,065	15	0,338	6313
399,5	11490	0,065	15	0,523	6342
400,5	11506	0,065	15	0,629	6347
401,5	11521	0,065	15	0,651	6297
402,5	11537	0,065	15	0,603	6351
403,5	11552	0,065	15	0,553	6383
404,5	11567	0,065	15	0,560	6378
405,5	11583	0,065	15	0,587	6345
406,5	11598	0,065	15	0,591	6300
407,5	11613	0,065	15	0,563	6282

## X - Annexes

408,5	11629	0,065	15	0,542	6282
409,5	11644	0,065	15	0,513	6307
410,5	11659	0,065	15	0,516	6297
411,5	11675	0,065	15	0,517	6286
412,5	11690	0,065	15	0,491	6265
413,5	11706	0,065	15	0,503	6262
414,5	11721	0,065	15	0,455	6242
415,5	11736	0,065	15	0,451	6212
416,5	11752	0,065	15	0,538	6166
417,5	11767	0,065	15	0,501	6192
418,5	11782	0,065	15	0,402	6242
419,5	11798	0,065	15	0,471	6311
420,5	11813	0,065	15	0,393	6197
421,5	11828	0,065	15	0,420	6129
422,5	11844	0,065	15	0,470	6071
423,5	11859	0,065	15	0,454	6060
424,5	11875	0,065	15	0,500	6060
425,5	11890	0,065	15	0,518	6110
426,5	11905	0,065	15	0,494	6165
427,5	11921	0,065	15	0,452	6157
428,5	11936	0,065	15	0,449	6138
429,5	11951	0,065	15	0,342	6135
430,5	11967	0,065	15	0,461	6096
431,5	11982	0,065	15	0,505	5963
432,5	11997	0,065	15	0,495	6104
433,5	12013	0,065	15	0,540	6185
434,5	12028	0,065	15	0,527	6148
435,5	12043	0,065	15	0,497	6172
436,5	12059	0,065	15	0,427	6185
437,5	12074	0,065	15	0,466	6169
438,5	12090	0,065	15	0,445	6129
439,5	12105	0,065	15	0,454	6115
440,5	12120	0,065	15	0,470	6133
441,5	12136	0,065	15	0,605	6144
442,5	12151	0,065	15	0,439	6149
443,5	12166	0,065	15	0,413	6121
444,5	12182	0,065	15	0,461	6109
445,5	12197	0,065	15	0,407	6087
446,5	12212	0,065	15	0,410	6079
447,5	12228	0,065	15	0,438	6104
448,5	12243	0,065	15	0,375	6061
449,5	12259	0,065	15	0,426	6061
450,5	12274	0,065	15	0,476	6092
451,5	12289	0,065	15	0,464	6066
452,5	12305	0,065	15	0,535	6177
453,5	12320	0,065	15	0,482	6171
454,5	12335	0,065	15	0,489	6185
455,5	12351	0,065	15	0,594	6203
456,5	12366	0,065	15	0,655	6195
457,5	12381	0,065	15	0,477	6242
458,5	12397	0,065	15	0,433	6262
459,5	12412	0,065	15	N.A.	6126



## X - Annexes

460,5	12427	0,065	15	N.A.	6200
461,5	12443	0,065	15	N.A.	6011
462,5	12458	0,065	15	N.A.	6256
463,5	12474	0,065	15	N.A.	6264
464,5	12489	0,065	15	N.A.	6238
465,5	12504	0,065	15	N.A.	6204
466,5	12520	0,065	15	N.A.	6069
467,5	12535	0,065	15	N.A.	6276
468,5	12550	0,065	15	N.A.	6295
469,5	12566	0,065	15	N.A.	6227
470,5	12581	0,065	15	N.A.	6257
471,5	12596	0,065	15	N.A.	6421
472,5	12612	0,065	15	N.A.	6338
473,5	12627	0,065	15	N.A.	6408
474,5	12643	0,065	15	N.A.	6219
475,5	12658	0,065	15	N.A.	6186
476,5	12673	0,065	15	N.A.	6168
477,5	12689	0,065	15	N.A.	6085
478,5	12704	0,065	15	N.A.	6082
479,5	12719	0,065	15	N.A.	6091
480,5	12735	0,065	15	N.A.	6184
481,5	12750	0,065	15	N.A.	6145
482,5	12765	0,065	15	N.A.	6144
483,5	12781	0,065	15	N.A.	6133
484,5	12796	0,065	15	N.A.	6096
485,5	12812	0,065	15	N.A.	6105
486,5	12827	0,065	15	N.A.	6061
487,5	12842	0,065	15	N.A.	6046
488,5	12858	0,065	15	N.A.	6059
489,5	12873	0,065	15	N.A.	6076
490,5	12888	0,065	15	N.A.	6067
491,5	12904	0,065	15	N.A.	6122
492,5	12919	0,065	15	N.A.	6131
493,5	12934	0,065	15	N.A.	6122
494,5	12950	0,065	15	N.A.	6109
495,5	12965	0,065	15	N.A.	6134
496,5	12980	0,065	15	N.A.	6135
497,5	12996	0,065	15	N.A.	6122
498,5	13011	0,065	15	N.A.	6203
499,5	13027	0,065	15	N.A.	6248
500,5	13042	0,065	15	N.A.	6223
501,5	13057	0,065	15	N.A.	6222
502,5	13073	0,065	15	N.A.	6252
503,5	13088	0,065	15	N.A.	6290
504,5	13103	0,065	15	N.A.	6345
505,5	13119	0,065	15	N.A.	6330
506,5	13134	0,065	15	N.A.	6296
507,5	13149	0,065	15	N.A.	6288
508,5	13165	0,065	15	N.A.	6235
509,5	13180	0,065	15	N.A.	6254
510,5	13196	0,065	15	N.A.	6271
511,5	13211	0,065	15	N.A.	6293

## X - Annexes

512,5	13226	0,065	15	N.A.	6358
513,5	13242	0,065	15	N.A.	6337
514,5	13257	0,065	15	N.A.	6339
515,5	13272	0,065	15	N.A.	6402
516,5	13288	0,065	15	N.A.	6275
517,5	13303	0,065	15	N.A.	6172
518,5	13318	0,065	15	N.A.	6232
519,5	13334	0,065	15	N.A.	6268
520,5	13349	0,065	15	N.A.	6263
521,5	13365	0,065	15	N.A.	6294
522,5	13380	0,065	15	N.A.	6255
523,5	13395	0,065	15	N.A.	6231
524,5	13411	0,065	15	N.A.	6297
525,5	13426	0,065	15	N.A.	6281
526,5	13441	0,065	15	N.A.	6394
527,5	13457	0,065	15	N.A.	6283
528,5	13472	0,065	15	N.A.	6256
529,5	13487	0,065	15	N.A.	6270
530,5	13503	0,065	15	N.A.	6295
531,5	13518	0,065	15	N.A.	6436
532,5	13533	0,065	15	N.A.	6443
533,5	13549	0,065	15	N.A.	6444
534,5	13564	0,065	15	N.A.	6397
535,5	13580	0,065	15	N.A.	6434
536,5	13595	0,065	15	N.A.	6451
537,5	13610	0,065	15	N.A.	6404
538,5	13626	0,065	15	N.A.	6353
539,5	13641	0,065	15	N.A.	6488
540,5	13656	0,065	15	N.A.	6512
541,5	13672	0,065	15	N.A.	6414
542,5	13687	0,065	15	N.A.	6387
543,5	13702	0,065	15	N.A.	6365
544,5	13718	0,065	15	N.A.	6313
545,5	13733	0,065	15	N.A.	6412
546,5	13749	0,065	15	N.A.	6461
547,5	13764	0,065	15	N.A.	6436
548,5	13779	0,065	15	N.A.	6453
549,5	13795	0,065	15	N.A.	6344
550,5	13810	0,065	15	N.A.	6419

**Tableau X-8 :** Données géochimiques élémentaires et de pyrolyse Rock-Eval de la carotte B13

<b>Prof.</b> (cm)	<b>Âge</b> (ans cal BP)	<b>N</b> (%)	<b>C</b> (%)	<b>COT</b> (%)	<b>C-COT</b> (%)	<b>COT:N</b> (Atomique)	<b>IH</b> (mg HC ·g COT <sup>-1</sup> ) <sup>1)</sup>	<b>IO</b> (mg O <sub>2</sub> ·g COT <sup>-1</sup> ) <sup>1)</sup>
0,5	864	0,87	7,67	7,61	0,06	10,22	487	97
1,5	876	0,79	7,16	6,90	0,26	10,13	465	83
2,5	888	0,79	7,59	6,92	0,67	10,21	474	87
3,5	900	0,77	7,49	6,62	0,87	10,04	465	94
4,5	913	0,76	7,33	6,56	0,77	10,06	505	108
5,5	925	0,79	7,55	7,03	0,52	10,32	480	82
6,5	937	0,82	7,44	7,36	0,09	10,41	475	75
7,5	949	0,98	8,88	8,87	0,02	10,52	486	74
8,5	961	0,93	8,59	8,52	0,07	10,72	494	71
9,5	973	1,02	9,50	9,60	-0,10	10,99	506	84
10,5	986	0,94	9,00	8,87	0,13	10,99	504	82
11,5	998	0,96	9,78	8,70	1,08	10,60	519	97
12,5	1010	0,94	9,05	8,38	0,68	10,41	492	89
13,5	1022	0,90	8,56	8,27	0,29	10,74	465	78
14,5	1034	1,06	10,23	9,63	0,60	10,62	532	88
15,5	1046	1,06	10,71	9,84	0,87	10,82	501	88
16,5	1058	1,29	11,84	10,77	1,08	9,72	518	87
17,5	1071	0,30	4,04	7,49	-3,45	29,08	536	106
18,5	1083	0,96	10,20	7,59	2,61	9,23	522	119
19,5	1095	1,21	12,71	10,91	1,80	10,53	554	103
20,5	1107	0,72	9,14	8,85	0,30	14,24	506	100
21,5	1119	0,84	10,24	6,83	3,42	9,43	524	108
22,5	1131	0,86	9,15	7,72	1,43	10,51	509	93
23,5	1144	0,69	7,54	6,08	1,46	10,32	546	94
24,5	1156	0,61	7,37	5,53	1,84	10,55	588	112
25,5	1168	0,74	7,94	6,62	1,33	10,39	536	84
26,5	1180	0,76	8,39	6,65	1,74	10,25	521	99
27,5	1192	0,95	9,86	8,85	1,01	10,88	529	89
28,5	1204	1,02	10,21	9,63	0,58	10,95	512	85
29,5	1216	1,15	11,09	10,30	0,79	10,41	526	92
30,5	1229	0,92	9,71	8,24	1,48	10,40	513	102
31,5	1241	0,92	9,78	8,24	1,55	10,44	494	101
32,5	1253	0,83	8,67	7,18	1,49	10,09	485	106
33,5	1265	0,95	8,75	8,58	0,17	10,48	474	82
34,5	1277	1,00	9,16	8,93	0,23	10,42	508	80
35,5	1289	0,96	8,65	8,38	0,27	10,20	486	77
36,5	1301	0,97	8,67	8,28	0,39	9,97	488	76
37,5	1314	0,91	8,12	7,76	0,36	9,92	493	74
38,5	1326	0,82	7,33	7,13	0,20	10,17	452	79
39,5	1338	0,98	8,75	8,65	0,10	10,29	501	76
40,5	1350	0,84	7,49	7,15	0,34	9,99	474	77
41,5	1362	0,86	7,81	7,31	0,50	9,96	467	81
42,5	1374	0,84	7,60	7,40	0,20	10,30	478	72
43,5	1387	0,99	9,14	8,87	0,27	10,49	492	73
44,5	1399	1,15	10,97	10,90	0,07	11,04	534	77
45,5	1411	1,10	11,41	10,64	0,77	11,32	497	91
46,5	1423	0,96	10,62	8,80	1,83	10,69	520	98
47,5	1435	1,03	10,90	9,54	1,36	10,75	505	97

## X - Annexes

48,5	1447	1,03	10,50	9,48	1,03	10,76	518	92
49,5	1459	0,89	10,36	8,70	1,66	11,39	518	102
50,5	1472	0,71	7,29	5,94	1,36	9,74	523	98
51,5	1484	1,17	12,47	10,59	1,89	10,52	512	92
52,5	1496	1,17	12,09	10,73	1,36	10,72	515	90
53,5	1503	0,92	10,22	8,50	1,73	10,72	511	97
54,5	1509	0,82	9,74	7,62	2,11	10,83	482	111
55,5	1515	0,70	8,66	6,31	2,36	10,53	508	109
56,5	1521	0,87	10,15	8,18	1,97	10,92	511	99
57,5	1528	0,93	10,22	8,47	1,76	10,63	495	118
58,5	1534	0,76	9,32	6,65	2,67	10,19	473	145
59,5	1540	0,92	10,48	8,58	1,89	10,87	486	122
60,5	1546	0,75	9,36	6,98	2,39	10,80	491	140
61,5	1553	0,86	9,33	7,55	1,78	10,25	508	135
62,5	1559	0,91	9,80	7,59	2,22	9,77	470	146
63,5	1565	0,93	10,57	8,18	2,40	10,23	497	154
64,5	1571	0,69	7,77	6,05	1,71	10,27	527	135
65,5	1578	0,82	9,50	6,81	2,69	9,69	503	144
66,5	1584	0,77	8,34	6,49	1,86	9,82	520	124
67,5	1590	0,82	8,55	6,77	1,78	9,68	526	109
68,5	1596	0,93	8,57	7,53	1,04	9,41	474	113
69,5	1603	0,80	7,56	7,13	0,43	10,34	464	97
70,5	1609	0,85	8,20	7,55	0,65	10,36	447	109
71,5	1615	0,93	9,09	8,37	0,72	10,55	497	106
72,5	1621	1,11	10,55	10,06	0,49	10,53	490	95
73,5	1628	1,31	12,66	12,00	0,66	10,70	497	100
74,5	1634	1,15	11,07	11,27	-0,20	11,47	538	88
75,5	1640	0,97	9,42	8,87	0,55	10,68	471	101
76,5	1646	1,11	10,84	10,01	0,83	10,53	491	98
77,5	1653	1,06	10,41	9,57	0,84	10,51	480	101
78,5	1659	1,00	10,81	9,12	1,70	10,59	497	118
79,5	1665	0,83	9,53	7,59	1,94	10,71	506	121
80,5	1671	0,94	9,56	8,32	1,24	10,36	490	122
81,5	1678	0,73	8,21	6,41	1,81	10,24	525	130
82,5	1684	0,86	8,90	7,90	1,00	10,66	499	118
83,5	1690	0,99	10,05	8,92	1,13	10,48	501	117
84,5	1686	0,81	7,87	7,59	0,28	10,94	496	98
85,5	1691	0,84	8,20	7,34	0,87	10,15	483	104
86,5	1697	0,83	7,95	7,32	0,63	10,25	468	100
87,5	1702	0,86	8,23	7,34	0,89	9,97	462	103
88,5	1707	1,03	9,94	9,13	0,82	10,34	479	96
89,5	1712	0,97	9,58	9,50	0,08	11,37	516	93
90,5	1718	1,08	11,18	9,66	1,52	10,45	504	104
91,5	1723	1,16	11,46	10,45	1,01	10,53	496	108
92,5	1728	1,07	11,60	9,95	1,65	10,83	534	113
93,5	1734	0,93	10,16	8,15	2,01	10,25	519	129
94,5	1739	0,79	8,45	7,39	1,05	10,92	552	125
95,5	1744	0,82	8,93	6,59	2,34	9,41	503	151
96,5	1749	0,80	9,94	6,54	3,40	9,50	541	148
97,5	1755	1,00	11,82	8,82	3,00	10,31	562	129
98,5	1760	0,79	10,89	6,58	4,31	9,77	540	162
99,5	1765	0,75	8,78	7,15	1,63	11,09	507	127
100,5	1770	0,73	8,53	5,83	2,70	9,34	571	137
101,5	1776	0,80	10,01	7,71	2,29	11,22	495	133

# X - Annexes

102,5	1781	0,91	11,35	8,65	2,69	11,06	538	127
103,5	1786	0,62	9,10	5,52	3,58	10,36	556	148
104,5	1791	0,76	8,17	6,62	1,56	10,21	566	100
105,5	1797	0,70	10,59	6,64	3,95	11,10	539	144
106,5	1802	0,77	8,17	6,18	1,99	9,36	603	100
107,5	1807	0,62	6,35	4,67	1,68	8,72	533	113
108,5	1812	0,79	7,94	6,23	1,71	9,17	525	102
109,5	1818	0,77	11,54	6,46	5,09	9,82	596	92
110,5	1823	0,87	9,19	7,18	2,02	9,63	512	121
111,5	1828	0,73	7,91	6,24	1,67	9,99	530	113
112,5	1834	0,82	8,66	6,79	1,88	9,61	482	118
113,5	1839	0,82	8,27	6,86	1,41	9,80	493	112
114,5	1844	0,80	8,40	7,02	1,39	10,21	527	93
115,5	1849	0,84	9,00	7,49	1,52	10,43	524	110
116,5	1855	0,82	9,18	7,47	1,71	10,57	481	102
117,5	1860	0,96	10,30	8,74	1,56	10,65	517	97
118,5	1865	1,08	11,07	9,58	1,49	10,32	544	87
119,5	1870	0,97	10,35	8,85	1,51	10,68	540	94
120,5	1876	0,88	9,86	8,35	1,51	11,11	536	97
121,5	1881	1,08	11,93	10,53	1,40	11,39	535	94
122,5	1886	0,89	10,82	8,85	1,97	11,57	518	103
123,5	1891	0,85	10,03	7,96	2,07	10,94	529	107
124,5	1897	0,81	10,62	7,38	3,24	10,56	527	106
125,5	1902	0,79	9,06	7,29	1,77	10,80	512	107
126,5	1907	0,85	9,63	7,74	1,89	10,68	518	107
127,5	1912	0,87	9,08	8,40	0,68	11,27	514	88
128,5	1918	0,87	8,93	8,29	0,64	11,17	504	92
129,5	1923	0,81	9,35	7,51	1,85	10,86	532	100
130,5	1928	0,77	8,63	7,26	1,37	10,95	542	94
131,5	1934	0,82	9,07	7,41	1,66	10,53	494	96
132,5	1939	0,87	9,44	8,06	1,39	10,77	512	92
133,5	1944			6,84			500	79
134,5	1949			6,54			495	82
135,5	1955	0,88	7,88	6,94	0,94	9,23	511	76
136,5	1960	0,84	7,67	7,05	0,62	9,77	516	70
137,5	1965	1,15	10,77	7,75	3,03	7,85	516	71
138,5	1970	0,97	9,40	7,28	2,12	8,75	454	98
139,5	1976	0,36	3,63	8,07	-4,43	26,32	536	92
140,5	1981	0,93	8,34	7,05	1,29	8,83	505	123
141,5	1986	0,40	4,24	6,74	-2,50	19,51	502	126
142,5	1991	1,33	13,24	6,42	6,82	5,61	480	127
143,5	1997	0,98	9,19	7,12	2,07	8,46	496	97
144,5	2002	0,70	6,67	7,16	-0,48	11,94	506	94
145,5	2007	0,56	6,15	8,55	-2,40	17,80	499	100
146,5	2012	0,96	10,25	6,43	3,82	7,81	500	132
147,5	2018	0,82	9,99	6,92	3,07	9,87	504	132
148,5	2023	0,84	8,84	6,14	2,70	8,48	495	131
149,5	2028			6,55			511	110
150,5	2034	0,76	7,05	3,70	3,35	5,65	449	125
151,5	2039	0,52	4,75	4,42	0,33	10,00	431	118
152,5	2044	0,78	10,00	6,04	3,96	9,07	440	147
153,5	2049	0,82	8,43	7,61	0,82	10,77	482	124
154,5	2055	0,65	6,64	7,58	-0,94	13,67	509	110
155,5	2060	1,16	12,02	7,03	4,99	7,08	468	133

# X - Annexes

156,5	2065	0,79	8,62	6,64	1,99	9,83	470	123
157,5	2070	0,83	8,48					
158,5	2076	0,49	5,63	6,30	-0,66	14,92	397	134
159,5	2081	0,83	9,60	7,74	1,87	10,93	489	121
160,5	2086	0,85	9,73	6,87	2,85	9,44	441	146
161,5	2091	0,80	9,15	6,48	2,67	9,44	419	136
162,5	2097	0,71	8,19	6,06	2,13	9,91	410	136
163,5	2102	0,68	7,78	5,57	2,21	9,60	415	140
164,5	2107	0,69	7,37	6,13	1,24	10,35	458	124
165,5	2112	0,70	7,77	5,66	2,11	9,50	433	132
166,5	2118	0,74	8,26	5,88	2,38	9,33	415	134
167,5	2123	0,60	9,48	4,98	4,50	9,74	495	157
168,5	2128	0,64	8,35	4,88	3,46	8,92	476	157
169,5	2134	0,87	9,39	7,73	1,67	10,35	491	112
170,5	2153	0,95	9,58	7,36	2,22	9,03	449	122
171,5	2166	0,91	10,18	7,33	2,85	9,36	472	140
172,5	2179	0,64	6,83	4,61	2,22	8,44	483	148
173,5	2192	1,01	10,63	8,46	2,17	9,76	483	130
174,5	2205	0,87	9,45	7,70	1,75	10,34	522	110
175,5	2218	0,90	9,98	7,20	2,78	9,34	494	135
176,5	2232	0,89	9,32	7,07	2,25	9,31	446	130
177,5	2245	0,94	9,43	7,70	1,73	9,60	448	121
178,5	2258	0,88	8,56	7,26	1,31	9,60	417	112
179,5	2271	0,87	7,97	7,73	0,25	10,40	468	93
180,5	2284	0,78	7,26	6,20	1,06	9,27	410	109
181,5	2297	0,76	7,04	6,33	0,72	9,75	400	106
182,5	2310	0,93	8,54	7,17	1,38	9,00	413	109
183,5	2323	0,89	8,57	3,78	4,80	4,94	411	119
184,5	2337	0,85	8,43	7,67	0,76	10,47	458	105
185,5	2350	0,88	8,06	6,95	1,12	9,17	412	117
186,5	2363	1,00	9,60	7,21	2,40	8,37	432	127
187,5	2376	0,86	10,40	7,01	3,39	9,46	444	134
188,5	2389	0,82	8,62	5,96	2,65	8,49	408	144
189,5	2402	0,84	8,66	8,26	0,41	11,41	467	113
190,5	2415	1,04	10,46	8,41	2,05	9,47	429	130
191,5	2428	0,84	8,69	6,69	2,00	9,29	460	136
192,5	2442	0,70	7,06	5,05	2,00	8,42	459	146
193,5	2455	0,93	8,60	7,13	1,47	8,97	439	121
194,5	2468	0,86	7,86	7,52	0,35	10,19	466	97
195,5	2481	0,93	9,34	7,69	1,65	9,67	440	113
196,5	2494	0,88	8,54	7,01	1,53	9,30	421	113
197,5	2507	0,84	8,21	6,57	1,64	9,10	366	124
198,5	2520	0,96	9,09	7,40	1,69	8,96	433	126
199,5	2533	0,87	7,83	7,18	0,65	9,57	461	98
200,5	2547	0,84	7,98	6,38	1,60	8,82	405	131
201,5	2560	0,99	9,09	7,12	1,97	8,42	455	121
202,5	2573	0,87	8,71	7,14	1,57	9,53	427	119
203,5	2586	1,06	10,89	8,07	2,82	8,88	461	126
204,5	2599	0,75	7,47	6,37	1,10	9,92	489	112
205,5	2612	0,67	6,51	5,40	1,11	9,36	408	136
206,5	2625	0,88	8,23	6,74	1,49	8,98	408	117
207,5	2638	0,99	9,24	7,77	1,47	9,19	410	113
208,5	2652	0,94	8,86	7,39	1,47	9,21	406	125
209,5	2665	0,80	7,61	7,19	0,43	10,47	474	101

## X - Annexes

210,5	2678	0,55	5,65	4,44	1,21	9,44	391	140
211,5	2691	0,50	4,88	3,92	0,95	9,12	391	134
212,5	2704	0,54	4,93	4,07	0,85	8,76	403	130
213,5	2717	0,64	5,78	4,75	1,03	8,61	434	133
214,5	2730	0,65	5,96	5,55	0,41	10,01	466	100
215,5	2743	0,71	6,53	5,30	1,23	8,67	441	126
216,5	2757	0,87	8,21	6,35	1,86	8,54	510	80
217,5	2770	0,47	4,42	3,82	0,60	9,47	466	113
218,5	2783	0,70	6,49	5,69	0,80	9,48	475	84
219,5	2796	0,80	7,72	6,89	0,84	10,01	519	81
220,5	2809	0,71	7,71	6,41	1,30	10,55	483	100
221,5	2822	0,46	4,57	3,11	1,47	7,92	428	141
222,5	2835	0,43	3,86	2,80	1,06	7,54	411	156
223,5	2848	0,43	3,69	2,29	1,41	6,18	406	175
224,5	2862	0,48	4,32	2,19	2,14	5,31	415	168
225,5	2875	0,56	5,06	3,45	1,62	7,16	458	137
226,5	2888	0,45	4,26	3,04	1,22	7,85	464	135
227,5	2901	0,46	4,46	3,08	1,38	7,72	467	128
228,5	2914	0,46	4,73	3,49	1,25	8,79	484	116
229,5	2927	0,47	4,20	2,39	1,81	5,93	461	136
230,5	2940	0,39	3,85	2,05	1,80	6,06	453	150
231,5	2953	0,41	3,89	2,16	1,73	6,08	420	146
232,5	2967	0,30	2,58	1,63	0,95	6,39	401	168
233,5	2980	0,39	3,52	1,78	1,74	5,28	406	163
234,5	2993	0,35	3,22	1,70	1,53	5,62	418	143
235,5	3006	0,39	3,48	1,84	1,64	5,56	424	161
236,5	3019	0,40	3,70	2,36	1,33	6,88	412	149
237,5	3032	0,48	4,18	2,60	1,58	6,35	448	140
238,5	3045	0,53	4,98	3,84	1,14	8,42	471	120
239,5	3058	0,58	7,20	4,06	3,15	8,15	491	126
240,5	9048	0,60	6,73	5,56	1,17	10,76	500	93
241,5	9063	0,60	5,52	4,66	0,86	9,13	456	90
242,5	9079	0,65	5,49	4,88	0,61	8,70	449	84
243,5	9094	0,63	5,06	4,58	0,49	8,52	435	86
244,5	9110	0,61	5,44	5,07	0,37	9,67	482	81
245,5	9125	0,58	5,47	5,19	0,28	10,37	450	78
246,5	9140	0,61	5,60	5,24	0,37	10,09	471	75
247,5	9156	0,70	6,42	6,13	0,29	10,16	476	74
248,5	9171	0,77	6,90	6,37	0,53	9,59	477	80
249,5	9186	0,64	5,57	4,89	0,69	8,96	508	86
250,5	9202	0,67	5,73	4,96	0,78	8,65	466	92
251,5	9217	0,64	6,08	5,30	0,79	9,70	466	91
252,5	9232	0,60	5,81	5,36	0,45	10,41	475	80
253,5	9248	0,66	6,20	5,92	0,28	10,41	456	75
254,5	9263	0,72	6,71	6,38	0,34	10,37	506	67
255,5	9278	0,79	7,96	7,45	0,51	10,95	505	67
256,5	9294	0,68	6,69	5,70	0,99	9,80	507	74
257,5	9309							
258,5	9325	0,63	5,83	5,32	0,51	9,84	476	77
259,5	9340	0,66	6,13	5,35	0,79	9,51	444	87
260,5	9355	0,76	7,09	8,35	-1,26	12,74	465	74
261,5	9371	0,70	6,31	5,62	0,69	9,40	466	83
262,5	9386	0,70	5,89	5,57	0,32	9,31	449	80

## X - Annexes

263,5	9401	0,94	7,79	7,15	0,64	8,86	465	80
264,5	9417	0,88	7,89	6,41	1,48	8,48	487	97
265,5	9432	0,85	7,92	7,15	0,77	9,86	473	88
266,5	9447	0,77	7,08	6,71	0,37	10,21	490	78
267,5	9463	0,67	6,21	6,09	0,12	10,62	470	77
268,5	9478	0,66	6,41	5,31	1,10	9,44	453	95
269,5	9494	0,66	6,39	5,16	1,23	9,15	456	103
270,5	9509	0,68	6,84	5,47	1,37	9,31	419	151
271,5	9524	0,72	6,57	5,32	1,25	8,65	436	134
272,5	9540	0,64	5,56	4,90	0,67	8,96	439	113
273,5	9555	0,60	5,47	5,04	0,44	9,78	417	109
274,5	9570	0,61	5,63	5,10	0,54	9,79	412	106
275,5	9586	0,63	5,52	4,80	0,72	8,87	414	112
276,5	9601	0,68	5,87	5,15	0,73	8,81	432	122
277,5	9616	0,69	6,56	5,55	1,02	9,36	431	110
278,5	9632	0,81	8,09	6,70	1,40	9,62	497	121
279,5	9647	0,69	7,69	6,00	1,69	10,12	522	116
280,5	9663	0,72	6,74	5,61	1,13	9,09	443	130
281,5	9678	0,66	5,85	5,70	0,15	10,00	427	104
282,5	9693	0,66	5,89	5,17	0,72	9,08	420	119
283,5	9709	0,66	5,86	5,59	0,27	9,88	440	110
284,5	9724	0,63	5,71	5,12	0,59	9,49	476	101
285,5	9739	0,73	6,71	6,23	0,48	9,99	460	106
286,5	9755	0,76	6,08	5,42	0,66	8,35	447	121
287,5	9770	0,84	5,96	5,18	0,78	7,16	429	129
288,5	9785	0,73	6,14	5,38	0,75	8,57	469	124
289,5	9801	0,62	5,60	4,37	1,23	8,20	450	129
290,5	9816	0,68	6,05	4,37	1,68	7,47	413	154
291,5	9831	0,87	7,33	5,85	1,47	7,83	461	126
292,5	9847	0,98	7,95	6,99	0,96	8,35	457	104
293,5	9862	0,91	7,51	6,22	1,29	7,99	438	122
294,5	9878	0,79	6,05	5,55	0,50	8,16	473	103
295,5	9893	0,65	5,60	4,83	0,77	8,63	419	119
296,5	9908	0,66	6,28	5,19	1,09	9,14	441	124
297,5	9924	0,67	7,01	5,59	1,43	9,71	444	142
298,5	9939	0,74	8,50	6,31	2,20	9,91	433	142
299,5	9954	0,82	8,69	6,50	2,20	9,23	441	133
300,5	9970	0,72	7,17	5,20	1,97	8,41	370	151
301,5	9985	0,71	6,03	4,48	1,55	7,36	372	147
302,5	10000	0,66	5,65	4,17	1,48	7,32	362	145
303,5	10016	0,77	6,32	4,54	1,78	6,86	408	142
304,5	10031	0,71	5,77	4,74	1,03	7,81	427	121
305,5	10047	0,77	5,60	4,35	1,25	6,55	390	136
306,5	10062	0,78	6,33	4,91	1,42	7,34	386	122
307,5	10077	0,82	6,50	5,04	1,46	7,12	406	134
308,5	10093	0,93	6,83	5,21	1,62	6,50	404	140
309,5	10108	0,87	6,82	5,99	0,83	7,99	427	126
310,5	10123	0,93	7,49	5,96	1,53	7,45	423	132
311,5	10139	0,91	7,44	5,93	1,51	7,61	448	129
312,5	10154	0,83	6,38	5,27	1,12	7,44	387	133
313,5	10169	0,80	6,44	4,89	1,55	7,17	416	140
314,5	10185	0,84	6,64	5,70	0,94	7,94	431	127
315,5	10200	0,80	6,33	4,99	1,34	7,31	391	143
316,5	10216	0,83	5,57	4,32	1,24	6,08	331	173



## X - Annexes

317,5	10231	0,83	6,42	5,21	1,22	7,35	394	136
318,5	10246	0,82	6,39	5,01	1,39	7,12	382	150
319,5	10262	0,78	5,73	5,33	0,40	8,01	404	121
320,5	10277	0,63	5,19	4,14	1,05	7,64	382	132
321,5	10292	0,70	5,47	4,35	1,13	7,20	372	130
322,5	10308	0,67	5,22	4,15	1,07	7,16	354	144
323,5	10323	0,77	5,38	4,40	0,98	6,62	366	150
324,5	10338	0,69	5,59	4,94	0,65	8,38	403	112
325,5	10354	0,59	5,24	4,38	0,87	8,61	379	125
326,5	10369	0,73	6,19	5,07	1,13	8,11	396	127
327,5	10384	1,10	7,20	5,92	1,29	6,25	415	126
328,5	10400	0,92	7,16	5,49	1,67	6,95	423	135
329,5	10415	0,97	7,01	5,95	1,06	7,14	437	128
330,5	10431	0,80	6,88	5,50	1,38	8,00	406	137
331,5	10446	0,87	7,63	5,51	2,12	7,38	400	142
332,5	10461	0,75	6,23	5,15	1,08	8,04	407	131
333,5	10477	0,75	5,57	4,62	0,95	7,20	398	129
334,5	10492	0,75	6,01	5,59	0,42	8,64	422	114
335,5	10507	0,73	5,58	4,46	1,12	7,08	379	134
336,5	10523	0,71	5,60	3,89	1,72	6,41	401	149
337,5	10538	0,70	5,84	4,38	1,46	7,29	409	140
338,5	10553	0,69	5,57	4,59	0,98	7,77	388	127
339,5	10569	0,71	5,42	5,06	0,36	8,34	418	100
340,5	10584	0,72	5,62	4,86	0,76	7,89	401	111
341,5	10600	0,72	5,73	4,66	1,07	7,50	399	124
342,5	10615	0,70	5,86	4,66	1,20	7,75	409	126
343,5	10630	0,65	5,37	4,13	1,24	7,46	405	127
344,5	10646	0,80	6,46	5,58	0,88	8,10	431	113
345,5	10661	0,84	6,39	5,19	1,20	7,24	397	118
346,5	10676	0,70	6,10	5,16	0,94	8,54	393	116
347,5	10692	0,71	6,11	4,93	1,18	8,10	406	121
348,5	10707	0,90	7,05	5,47	1,58	7,11	438	127
349,5	10722	1,02	8,98	7,73	1,25	8,86	447	115
350,5	10738	0,98	8,75	6,64	2,11	7,92	453	132
351,5	10753	0,97	7,36	5,89	1,47	7,06	437	123
352,5	10769	0,89	7,26	6,33	0,93	8,33	423	116
353,5	10784	0,83	7,12	6,02	1,10	8,42	437	114
354,5	10799	0,79	6,69	6,19	0,50	9,13	461	97
355,5	10815	0,89	7,14	6,12	1,03	7,99	453	108
356,5	10830	0,71	6,02	4,80	1,23	7,87	405	111
357,5	10845	0,74	6,21	5,34	0,88	8,46	430	104
358,5	10861	0,93	7,78	6,54	1,24	8,17	448	114
359,5	10876	0,91	7,65	5,91	1,75	7,54	440	111
360,5	10891	0,79	7,61	5,94	1,68	8,74	446	140
361,5	10907	0,80	6,92	5,46	1,46	7,92	441	135
362,5	10922	0,77	5,86	4,77	1,09	7,21	406	140
363,5	10937	0,75	4,98	3,43	1,56	5,30	365	150
364,5	10953	0,61	4,47	3,99	0,48	7,62	401	120
365,5	10968	0,62	4,65	4,36	0,30	8,17	391	129
366,5	10984	0,71	5,79	4,83	0,96	7,95	418	117
367,5	10999	0,65	5,15	4,22	0,94	7,57	411	126
368,5	11014	0,58	4,89	4,07	0,82	8,19	416	127
369,5	11030	0,58	4,82	4,26	0,56	8,50	428	112
370,5	11045	0,65	4,77	4,44	0,34	7,99	400	135

## X - Annexes

371,5	11060	0,85	6,76	5,31	1,45	7,24	461	134
372,5	11076	0,78	6,08	4,69	1,39	6,98	362	155
373,5	11091	0,71	5,16	4,24	0,92	6,95	354	175
374,5	11106	0,69	5,08	4,64	0,44	7,86	408	149
375,5	11122	0,77	5,49	3,51	1,98	5,33	383	174
376,5	11137	0,74	5,36	4,09	1,27	6,46	409	148
377,5	11153	0,95	6,78	4,26	2,52	5,24	369	198
378,5	11168	0,88	6,90	3,11	3,79	4,13	316	252
379,5	11183	0,71	6,58	2,77	3,82	4,57	320	236
380,5	11199	0,81	6,10	3,50	2,60	5,06	352	228
381,5	11214	0,72	6,46	3,98	2,47	6,41	402	188
382,5	11229	0,86	7,10	4,46	2,64	6,08	445	157
383,5	11245	0,75	6,29	4,21	2,08	6,53	433	149
384,5	11260	0,71	5,73	4,68	1,05	7,67	447	150
385,5	11275	0,76	5,98	4,44	1,54	6,80	357	145
386,5	11291	0,83	6,46	4,18	2,28	5,90	422	155
387,5	11306	0,75	5,50	4,11	1,39	6,40	359	157
388,5	11322	0,68	5,26	4,36	0,90	7,44	367	143
389,5	11337	0,69	5,27	4,94	0,34	8,37	408	140
390,5	11352	0,63	4,73	3,86	0,87	7,12	331	146
391,5	11368	0,66	4,66	3,98	0,68	7,01	359	151
392,5	11383	0,61	4,35	3,67	0,68	7,07	367	144
393,5	11398	0,60	4,18	3,37	0,81	6,60	373	161
394,5	11414	0,53	3,97	3,40	0,57	7,43	402	144
395,5	11429	0,61	3,96	3,24	0,72	6,19	341	150
396,5	11444	0,58	4,32	3,71	0,61	7,44	373	138
397,5	11460	0,67	4,52	3,45	1,07	6,04	325	163
398,5	11475	0,69	4,76	3,61	1,15	6,06	323	167
399,5	11490	0,74	4,95	3,97	0,98	6,21	351	157
400,5	11506	0,69	4,60	3,63	0,97	6,09	333	175
401,5	11521	0,68	4,38	3,32	1,06	5,70	321	179
402,5	11537	0,68	4,47	3,63	0,84	6,23	338	161
403,5	11552	0,78	5,05	4,12	0,93	6,16	344	153
404,5	11567	0,61	4,37	3,65	0,72	7,01	368	147
405,5	11583	0,81	4,65	3,45	1,20	4,95	322	182
406,5	11598	0,60	4,07	3,14	0,93	6,06	351	158
407,5	11613	0,54	4,02	3,23	0,79	7,03	363	153
408,5	11629	0,63	4,62	3,75	0,87	6,93	338	156
409,5	11644	0,63	4,78	4,47	0,30	8,28	394	142
410,5	11659	0,67	5,02	4,20	0,83	7,34	388	142
411,5	11675	0,70	5,12	4,22	0,91	7,00	380	149
412,5	11690	0,71	5,19	4,16	1,03	6,79	387	151
413,5	11706	0,70	5,05	4,14	0,92	6,91	376	149
414,5	11721	0,72	4,98	4,17	0,81	6,77	405	137
415,5	11736	0,77	5,13	4,26	0,87	6,47	383	134
416,5	11752	0,68	4,89	4,02	0,87	6,91	380	149
417,5	11767	0,75	5,84	4,64	1,20	7,20	390	152
418,5	11782	0,65	6,93	5,27	1,66	9,42	402	119
419,5	11798	0,77	7,01	5,38	1,62	8,17	416	121
420,5	11813	0,65	7,26	5,26	2,00	9,45	435	122
421,5	11828	0,66	7,17	4,92	2,26	8,70	442	119
422,5	11844	0,69	6,15	5,09	1,07	8,64	391	123
423,5	11859			4,53			389	115
424,5	11875	0,62	4,89	4,11	0,78	7,72	425	115

## X - Annexes

425,5	11890	0,52	4,56	4,07	0,50	9,10	369	119
426,5	11905	0,58	5,23	4,10	1,14	8,24	382	111
427,5	11921	0,59	5,15	4,42	0,73	8,74	400	107
428,5	11936	0,76	6,31	5,24	1,07	8,06	407	113
429,5	11951	0,72	6,32	5,38	0,94	8,74	436	112
430,5	11967	0,57	5,04	4,12	0,93	8,49	393	118
431,5	11982	0,59	5,22	4,41	0,81	8,69	410	104
432,5	11997	0,63	5,36	4,49	0,88	8,31	406	112
433,5	12013	0,55	5,01	4,25	0,77	9,01	423	111
434,5	12028	0,66	5,31	4,82	0,49	8,54	460	105
435,5	12043	0,57	5,71	4,59	1,12	9,39	397	109
436,5	12059	0,72	6,34	4,95	1,39	8,01	421	111
437,5	12074	0,72	5,96	4,82	1,14	7,83	437	102
438,5	12090	0,66	5,53	4,59	0,94	8,14	418	107
439,5	12105	0,59	5,24					
440,5	12120	0,62	5,46	4,58	0,88	8,63	415	106
441,5	12136	0,63	5,29	4,38	0,91	8,06	414	103
442,5	12151	0,69	5,55	4,65	0,90	7,91	428	104
443,5	12166	0,71	5,73	4,66	1,07	7,69	429	105
444,5	12182	0,70	6,18	5,67	0,51	9,41	451	93
445,5	12197	0,71	5,98	4,74	1,24	7,81	430	111
446,5	12212	0,79	6,22	5,01	1,21	7,39	442	103
447,5	12228	0,68	5,96	4,85	1,11	8,36	391	116
448,5	12243	0,70	6,06	5,13	0,93	8,53	422	106
449,5	12259	0,82	6,14	5,34	0,80	7,58	466	99
450,5	12274	0,66	5,97	4,28	1,69	7,59	386	143
451,5	12289	0,61	5,20	4,45	0,75	8,48	375	120
452,5	12305	0,58	4,94	4,22	0,72	8,46	400	112
453,5	12320	0,55	4,82	4,13	0,69	8,72	402	116
454,5	12335	0,55	4,78	4,30	0,48	9,05	436	97
455,5	12351	0,48	4,17	3,34	0,83	8,07	408	125
456,5	12366	0,54	3,46	2,68	0,78	5,75	416	134
457,5	12381	0,56	4,47	3,45	1,02	7,18	415	120
458,5	12397	0,54	4,62	3,88	0,74	8,42	380	115

X - Annexes

**Tableau X-9 :** Données de la pétrographie organique (palynofaciès) de la carotte B13

<i>Prof.</i> (cm)	<i>Âge</i> (ans cal BP)	<i>LCT</i> (%)	<i>LCA</i> (%)	<i>MOA</i> <i>Rou.</i> (%)	<i>LCO</i> (%)	<i>DG</i> (%)	<i>Myc.</i> (%)	<i>Pyrof.</i> (%)	<i>Sp-Po</i> (%)	<i>C-M</i> (%)	<i>Zoo.</i> (%)	<i>Din.</i> (%)	<i>Alg.</i> (%)	<i>MOA</i> <i>Gel.</i> (%)	<i>GAO</i> (%)	<i>MOA</i> <i>Flo.</i> (%)	<i>MOA</i> <i>Gru.</i> (%)	<i>MOA</i> <i>Opa.</i> (%)	<i>Pyrite</i> (%)	<i>Terr</i> <i>estre</i> (%)	<i>Marin</i> (%)	<i>Mar/Ter</i>
0,5	864	0,0	0,0	0,0	0,6	0,0	0,1	0,0	0,1	0,9	0,0	0,0	0,1	63,4	3,4	12,7	15,3	0,0	3,5	1,6	94,9	57,6
4,5	913	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	66,6	2,6	12,1	15,1	0,0	3,0	0,4	96,4	224,1
9,5	973	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	0,0	0,0	0,0	51,3	12,2	23,5	8,4	0,0	3,5	1,0	95,4	93,5
14,5	1034	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	2,5	0,0	0,0	0,2	53,0	5,1	19,6	16,5	0,1	2,7	2,7	94,6	34,8
19,5	1095	0,0	0,0	0,5	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	2,9	0,1	0,0	0,1	65,1	5,2	19,1	5,7	0,0	1,1	3,5	95,4	27,2
24,5	1156	0,0	0,0	0,1	0,3	0,0	0,0	0,0	3,2	1,5	0,0	0,0	0,0	21,9	14,4	50,8	6,6	0,1	1,1	5,2	93,7	18,2
29,5	1216	0,0	0,0	0,0	0,3	0,4	0,0	0,0	0,1	1,5	0,1	0,0	0,1	60,7	15,9	14,1	5,3	0,0	1,5	2,3	96,2	41,3
34,5	1277	0,0	0,0	0,3	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	1,5	0,0	0,0	0,1	50,9	8,0	16,3	21,6	0,0	1,2	2,0	96,8	49,0
39,5	1338	0,0	0,0	0,2	0,5	0,0	0,0	0,0	0,2	3,3	0,7	0,0	0,0	62,2	8,0	13,0	10,3	0,0	1,5	4,1	94,3	22,8
44,5	1399	0,0	0,0	0,2	0,2	0,6	0,0	0,0	0,1	0,6	0,5	0,0	0,1	59,8	7,9	13,6	14,2	0,0	2,1	1,7	96,2	56,5
49,5	1459	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	2,2	0,0	0,0	0,5	51,4	7,8	21,9	14,2	0,0	1,7	2,5	95,8	38,6
54,5	1528	0,0	0,0	0,3	0,2	0,0	0,0	0,0	0,8	1,9	0,0	0,0	0,0	49,1	8,8	24,0	12,5	0,0	2,4	3,2	94,5	29,9
59,5	1555	0,0	0,0	0,0	0,2	0,6	0,0	0,0	5,6	0,7	0,0	0,0	0,0	53,0	7,7	17,5	12,4	0,0	2,1	7,1	90,5	12,7
64,5	1581	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0,0	0,0	0,0	1,4	0,0	0,0	0,3	24,5	9,2	26,1	36,1	0,2	1,9	1,7	96,4	56,5
69,5	1607	0,0	0,0	0,1	0,2	0,3	0,0	0,0	0,0	0,6	0,0	0,0	0,0	30,3	7,0	34,2	23,6	0,0	3,7	1,1	95,1	83,1
74,5	1634	0,0	0,0	0,0	0,2	1,6	0,0	0,0	3,3	0,9	0,2	0,0	0,0	50,7	8,7	17,2	15,5	0,0	1,7	6,0	92,3	15,4
79,5	1660	0,0	0,0	0,0	0,1	2,6	0,0	0,0	1,5	4,7	0,2	0,0	0,0	43,5	8,7	26,2	10,9	0,0	1,5	8,9	89,6	10,0
84,5	1686	0,0	0,0	0,0	0,6	1,7	0,0	0,0	2,2	1,9	2,4	0,0	0,0	54,9	3,6	18,7	10,9	0,0	3,2	6,5	90,4	13,9
89,5	1712	0,0	0,0	0,3	0,4	0,3	0,0	0,0	0,6	2,5	0,0	0,0	0,0	57,9	4,2	17,7	13,8	0,0	2,3	4,2	93,5	22,2
94,5	1739	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	1,6	0,0	0,0	0,0	41,8	10,7	41,8	2,8	0,0	1,1	1,7	97,2	57,8
104,5	1791	0,0	0,0	0,3	0,3	0,9	0,0	0,0	0,5	0,3	0,2	0,0	0,0	24,3	8,1	64,0	0,0	0,2	0,9	2,2	96,9	43,6
109,5	1818	0,0	0,0	0,6	0,2	0,4	0,0	0,0	1,4	0,9	0,0	0,0	0,1	33,8	6,8	53,8	0,6	0,0	1,4	3,4	95,2	27,9
114,5	1844	0,0	0,0	0,2	0,5	0,1	0,0	0,0	0,2	9,0	0,0	0,0	0,1	56,9	4,6	24,8	0,0	0,0	3,4	10,1	86,5	8,6
119,5	1870	0,0	0,0	0,7	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	2,9	0,0	0,0	1,5	65,7	7,4	19,7	0,0	0,0	2,0	3,8	94,2	24,5
124,5	1897	0,0	0,0	0,2	0,4	0,1	0,0	0,0	0,0	3,9	0,0	0,0	0,7	57,6	7,3	28,4	0,0	0,0	1,5	4,6	94,0	20,6
129,5	1923	0,0	0,0	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	4,4	0,1	0,0	3,3	46,6	6,2	31,2	6,7	0,0	1,1	4,8	94,1	19,8
134,5	1949	0,0	0,0	0,1	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	5,0	0,1	0,0	0,0	36,9	3,1	40,9	10,9	0,0	1,9	6,1	92,0	15,0
144,5	2002	0,0	0,0	0,0	0,6	0,0	0,0	0,0	4,2	0,5	0,0	0,0	0,5	46,1	5,4	37,0	3,6	0,0	2,2	5,3	92,6	17,6
149,5	2028	0,0	0,0	0,0	0,4	0,4	0,0	0,0	0,0	2,4	0,2	0,0	0,3	47,5	6,0	37,0	3,4	0,0	2,3	3,2	94,5	29,3
154,5	2055	0,0	0,0	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,5	3,5	0,0	0,0	0,4	51,8	5,7	34,1	1,6	0,0	1,9	4,5	93,6	20,8
159,5	2081	0,0	0,0	0,1	0,3	0,1	0,0	0,0	1,5	3,2	0,0	0,0	0,4	48,9	6,2	37,4	0,0	0,0	2,0	5,1	93,0	18,2

# X - Annexes

164,5	2107	0,0	0,0	0,1	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	5,1	0,0	0,0	0,2	63,7	2,4	25,4	0,0	0,0	2,6	5,7	91,7	16,2
169,5	2134	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	1,9	0,0	0,0	0,1	52,6	4,6	38,2	0,0	0,6	1,5	2,3	96,2	41,0
174,5	2205	0,0	0,0	0,0	0,3	0,6	0,0	0,0	0,0	1,4	0,0	0,0	0,1	36,1	9,7	47,6	3,2	0,0	1,0	2,4	96,7	40,9
179,5	2271	0,0	0,0	1,0	1,2	0,8	0,0	0,0	0,9	1,6	0,3	0,0	0,6	44,3	3,2	44,4	0,0	0,0	1,7	5,4	92,8	17,1
184,5	2337	0,0	0,0	0,2	0,8	0,2	0,0	0,0	0,0	2,1	0,0	0,0	0,0	55,7	4,7	34,6	0,0	0,0	1,7	3,3	95,0	29,2
189,5	2402	0,0	0,0	0,0	1,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0	0,1	65,3	3,3	26,8	0,0	0,0	2,4	2,1	95,5	45,3
194,5	2468	0,0	0,0	0,2	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	1,7	0,0	0,0	0,1	60,6	3,4	30,1	1,2	0,0	1,8	2,8	95,4	34,3
199,5	2533	0,0	0,0	0,4	1,0	0,7	0,0	0,0	0,0	1,9	0,0	0,0	0,3	56,7	2,7	34,7	0,0	0,0	1,7	3,9	94,4	24,0
204,5	2599	0,0	0,0	0,1	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	6,5	0,0	0,0	0,3	40,6	11,3	40,0	0,0	0,0	0,8	7,0	92,3	13,3
209,5	2665	0,0	0,0	0,1	0,4	0,2	0,0	0,0	0,0	1,1	0,7	0,0	0,1	57,1	4,9	34,0	0,0	0,1	1,4	1,8	96,8	54,0
214,5	2730	0,0	0,0	0,1	0,9	0,8	0,0	0,0	0,0	3,6	0,0	0,0	0,0	58,9	1,5	32,8	0,0	0,0	1,4	5,3	93,2	17,5
219,5	2796	0,0	0,0	0,0	0,3	0,2	0,0	0,0	0,0	1,7	0,0	0,0	0,0	63,3	3,2	29,9	0,0	0,1	1,4	2,1	96,5	45,6
224,5	2862	0,0	0,0	0,5	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	48,8	1,3	42,9	0,0	0,0	2,6	4,3	93,0	21,4
229,5	2927	0,0	0,0	0,0	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,1	54,7	1,6	38,9	0,0	0,0	1,8	2,8	95,4	33,9
234,5	2993	0,0	0,0	0,1	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	0,0	0,0	0,3	47,7	0,9	38,3	8,4	0,0	2,6	1,8	95,7	53,9
239,5	3058	0,0	0,0	0,0	0,8	0,6	0,0	0,0	0,0	1,7	0,0	0,0	0,1	46,4	4,5	44,6	0,0	0,0	1,4	3,0	95,6	31,4
244,5	9110	0,0	0,0	0,0	1,2	0,1	0,7	0,0	2,2	2,2	0,0	0,0	0,0	52,9	1,8	36,2	0,0	0,0	2,7	6,5	90,8	13,9
249,5	9186	0,0	0,0	0,8	0,6	0,0	0,0	0,0	0,2	2,8	3,5	0,0	0,1	50,1	1,7	36,4	0,0	0,0	3,9	4,4	91,7	20,8
254,5	9263	0,0	0,0	0,0	0,3	0,3	0,0	0,0	0,0	4,1	0,0	0,0	0,5	52,3	4,2	36,7	0,0	0,0	1,6	4,7	93,7	19,8
259,5	9340	0,0	0,0	0,5	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	2,5	0,0	0,0	58,9	2,9	31,3	0,0	0,0	2,4	2,0	95,6	47,6
264,5	9417	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,3	0,0	0,0	2,7	0,0	0,0	0,1	61,7	3,1	30,2	0,0	0,0	1,5	3,4	95,2	28,2
269,5	9494	0,0	0,0	0,1	0,3	0,0	0,0	0,0	0,2	2,2	0,7	0,0	0,0	63,3	1,8	29,2	0,0	0,0	2,2	2,8	95,0	33,7
279,5	9647	0,0	0,0	0,1	0,5	0,3	0,0	0,0	0,0	2,1	0,0	0,0	0,0	51,1	5,5	38,7	0,0	0,0	1,6	3,0	95,4	31,6
284,5	9724	0,0	0,0	0,0	0,9	0,2	0,0	0,0	0,0	1,8	0,3	0,0	0,0	62,1	2,1	30,7	0,0	0,0	1,7	3,0	95,3	31,5
289,5	9801	0,0	0,0	0,1	0,5	0,0	0,0	0,0	1,4	1,1	0,0	0,0	0,2	67,1	2,1	25,0	0,0	0,0	2,5	3,2	94,4	29,8
294,5	9878	0,0	0,0	0,0	1,1	1,4	0,1	0,0	0,0	0,6	0,2	0,0	1,8	54,8	3,2	34,2	0,0	0,0	2,7	3,1	94,2	30,4
299,5	9954	0,0	0,0	0,0	0,5	0,4	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,1	69,3	3,8	23,6	0,0	0,0	1,9	1,3	96,9	77,5
304,5	10031	0,0	0,0	0,2	0,6	0,1	0,0	0,0	0,0	2,5	1,3	0,0	0,0	67,5	1,7	23,9	0,0	0,0	2,4	3,2	94,4	29,1
309,5	10108	0,0	0,0	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	3,5	0,7	0,0	0,1	64,0	2,7	26,6	0,0	0,0	1,4	4,5	94,1	21,1
314,5	10185	0,0	0,0	0,0	0,4	0,6	0,0	0,0	0,0	2,1	0,0	0,0	1,4	70,0	1,6	21,5	0,0	0,1	2,3	3,1	94,6	30,4
319,5	10262	0,0	0,0	0,3	0,8	0,0	0,0	0,0	0,1	6,1	0,1	0,0	0,4	64,7	2,2	23,4	0,0	0,0	1,8	7,4	90,8	12,2
324,5	10338	0,0	0,0	0,6	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	3,7	0,2	0,0	0,2	65,4	3,2	24,3	0,0	0,0	1,9	4,8	93,3	19,5
329,5	10415	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	2,6	0,0	0,0	0,1	68,7	2,0	24,4	0,0	0,0	1,9	2,9	95,3	33,1
334,5	10492	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	1,5	0,6	0,0	0,6	61,5	2,1	30,6	0,0	0,3	2,1	2,2	95,7	42,6

# X - Annexes

339,5	10569	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,3	3,8	3,0	0,0	0,6	52,5	2,6	34,0	0,0	0,0	2,7	4,5	92,7	20,5
344,5	10646	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	1,2	2,9	0,0	0,0	0,1	59,0	2,4	32,0	0,0	0,0	2,1	4,4	93,5	21,2
349,5	10722	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	3,3	0,0	0,0	0,2	63,8	2,6	28,2	0,0	0,0	1,5	3,7	94,7	25,4
354,5	10799	0,0	0,0	0,1	0,3	0,0	0,0	0,0	1,3	1,8	0,0	0,0	0,0	62,0	2,1	30,7	0,0	0,0	1,8	3,4	94,8	27,6
359,5	10876	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	3,5	0,7	0,0	0,2	67,5	4,6	21,5	0,0	0,1	1,5	3,9	94,6	24,4
364,5	10953	0,0	0,0	0,3	1,4	0,0	0,0	0,0	1,8	3,3	0,0	0,0	0,9	44,8	2,0	42,5	0,0	0,0	3,0	6,8	90,2	13,3
369,5	11030	0,0	0,0	0,2	1,6	0,0	0,0	0,0	0,2	1,6	0,0	0,0	1,6	61,9	1,9	28,5	0,0	0,0	2,4	3,6	94,0	26,2
374,5	11106	0,0	0,0	0,2	0,7	1,0	0,0	0,0	0,0	6,4	0,1	0,0	0,5	62,4	3,1	23,7	0,0	0,0	1,9	8,3	89,8	10,8
379,5	11183	0,0	0,0	0,0	0,3	0,2	0,0	0,0	0,0	33,4	0,0	0,0	3,6	41,5	2,0	17,1	0,0	0,0	1,9	34,0	64,1	1,9
384,5	11260	0,0	0,0	0,0	0,5	0,2	0,0	0,2	1,3	20,4	0,0	0,0	0,9	52,0	2,8	19,2	0,0	0,0	2,6	22,5	74,9	3,3
394,5	11414	0,0	0,0	0,0	0,4	0,3	0,0	0,0	0,0	12,0	0,0	0,0	0,5	55,6	1,9	26,5	0,0	0,0	2,6	12,7	84,6	6,6
399,5	11490	0,0	0,0	0,5	0,7	0,1	0,0	0,0	0,0	7,7	1,3	0,0	0,3	54,3	3,9	27,9	0,4	0,0	2,8	8,9	88,3	9,9
404,5	11567	0,0	0,0	0,0	0,6	0,0	0,0	0,0	0,1	10,4	0,3	0,0	0,1	62,0	2,0	21,2	0,0	0,0	3,2	11,2	85,6	7,7
409,5	11644	0,0	0,0	0,4	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	4,5	0,4	0,0	0,4	71,3	2,2	16,1	0,0	0,0	4,3	5,4	90,3	16,9
414,5	11721	0,0	0,0	0,2	1,1	0,6	0,0	0,0	1,8	12,0	0,0	0,0	0,6	61,8	2,2	17,4	0,0	0,0	2,3	15,7	82,0	5,2
419,5	11798	0,0	0,0	1,0	1,6	1,7	0,0	0,0	0,0	7,3	0,0	0,0	0,8	54,6	3,2	26,3	0,9	0,0	2,5	11,6	85,8	7,4
424,5	11875	0,0	0,0	0,1	0,5	0,7	0,0	0,0	0,0	5,2	0,6	0,0	0,1	48,5	1,7	40,9	0,0	0,0	1,7	6,5	91,9	14,2
429,5	11951	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1	0,0	0,0	1,4	8,2	0,0	0,0	0,6	48,4	2,8	35,1	0,0	0,0	3,1	9,9	87,0	8,8
434,5	12028	0,0	0,0	0,0	0,7	0,6	0,0	0,0	0,0	3,5	0,0	0,0	2,4	59,9	2,9	28,2	0,0	0,0	1,9	4,8	93,3	19,3
439,5	12105	0,0	0,0	0,0	0,8	0,9	0,0	0,0	0,7	8,0	0,0	0,0	1,3	57,9	2,3	26,2	0,0	0,0	1,8	10,4	87,8	8,4
444,5	12182	0,0	0,0	0,0	0,3	0,2	0,0	0,0	0,0	7,9	0,1	0,0	0,3	58,8	1,5	29,3	0,0	0,0	1,6	8,4	90,0	10,7
449,5	12259	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	8,6	0,3	0,0	0,1	54,6	2,4	31,8	0,0	0,0	1,8	9,0	89,2	9,9
454,5	12335	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	14,2	0,0	0,0	0,1	56,3	1,2	25,5	0,0	0,0	2,4	14,5	83,1	5,7

**Tableau X-10 :** Données géochimiques moléculaires, n-alcanes, de la carotte B13, en ng.g<sup>-1</sup>

<i>Prof. (cm)</i>	<i>Âge</i>	<i>C<sub>16</sub></i>	<i>C<sub>17</sub></i>	<i>C<sub>18</sub></i>	<i>C<sub>19</sub></i>	<i>C<sub>20</sub></i>	<i>C<sub>21</sub></i>	<i>C<sub>22</sub></i>	<i>C<sub>23</sub></i>	<i>C<sub>24</sub></i>	<i>C<sub>25</sub></i>	<i>C<sub>26</sub></i>	<i>C<sub>27</sub></i>	<i>C<sub>28</sub></i>	<i>C<sub>29</sub></i>	<i>C<sub>30</sub></i>	<i>C<sub>31</sub></i>	<i>C<sub>32</sub></i>	<i>C<sub>33</sub></i>	<i>C<sub>34</sub></i>	<i>Pristane</i>	<i>Phytane</i>
0,5	864	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,93	3,41	1,88	N.D.	N.D.	5,24	11,96	4,17	N.D.	7,65	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
4,5	913	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	2,88	1,72	4,37	12,18	4,70	9,92	2,83	13,74	23,87	24,39	N.D.	25,24	N.D.	17,20	20,88	N.D.	N.D.
9,5	973	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	2,75	N.D.	4,16	N.D.	3,80	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
14,5	1034	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	4,82	2,21	30,41	56,65	93,65	133,12	160,02	145,53	163,46	146,68	80,75	74,99	28,69	31,33	19,93	0,65	N.D.
19,5	1095	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	5,99	2,91	9,61	16,38	9,25	14,58	12,58	24,51	29,65	31,24	N.D.	31,29	N.D.	28,99	18,44	N.D.	N.D.
24,5	1156	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,71	N.D.	4,95	2,70	10,55	15,10	10,70	N.D.	7,60	N.D.	4,45	9,64	N.D.	N.D.
29,5	1216	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	4,50	2,01	8,33	11,04	5,62	10,16	3,74	17,54	20,63	22,14	N.D.	17,29	N.D.	4,67	20,21	N.D.	N.D.
34,5	1277	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	2,77	1,44	6,89	7,58	5,62	7,25	2,91	16,64	16,83	19,62	N.D.	22,30	N.D.	4,65	13,77	N.D.	N.D.
39,5	1338	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	2,29	0,53	4,15	5,37	6,09	13,81	32,32	60,22	92,35	109,11	84,69	72,49	32,69	32,42	14,55	N.D.	N.D.
44,5	1399	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	6,37	2,21	32,31	84,10	135,06	185,16	234,79	268,60	342,06	372,25	300,14	229,25	130,54	95,18	62,60	N.D.	N.D.
49,5	1459	N.D.	0,88	9,01	14,37	47,99	73,26	85,55	101,16	173,69	237,85	206,49	273,70	372,42	385,36	304,06	221,52	131,23	89,71	136,61	0,41	0,69
54,5	1528	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	5,26	2,71	10,84	22,90	16,37	23,72	20,21	39,02	49,54	55,46	27,60	42,53	12,03	5,76	18,23	N.D.	N.D.
59,5	1555	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	3,18	1,97	5,21	16,89	9,41	15,69	20,08	33,40	52,71	55,43	34,14	38,01	12,28	N.D.	17,65	N.D.	N.D.
64,5	1581	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	3,78	0,00	2,85	5,65	6,31	8,87	8,66	22,16	29,74	25,85	N.D.	18,80	N.D.	N.D.	16,03	N.D.	N.D.
69,5	1607	N.D.	N.D.	2,01	N.D.	9,32	2,51	10,59	12,85	5,61	9,57	3,26	17,03	18,70	25,34	N.D.	22,90	N.D.	N.D.	11,96	N.D.	N.D.
74,5	1634	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	5,23	3,28	6,28	10,40	3,49	8,81	3,14	14,84	17,89	18,78	N.D.	18,16	N.D.	5,54	N.D.	0,50	N.D.
79,5	1660	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	5,82	2,33	6,80	11,34	4,47	10,57	2,17	16,75	21,79	21,91	N.D.	18,11	N.D.	4,08	12,38	0,66	N.D.
84,5	1686	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	4,89	2,90	5,46	10,25	4,56	8,45	2,41	15,07	16,66	22,09	N.D.	19,95	N.D.	6,14	11,32	N.D.	N.D.
89,5	1712	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	1,54	0,67	0,82	1,13	N.D.	N.D.	3,52	N.D.	2,86	N.D.	N.D.	1,96	N.D.	N.D.
94,5	1739	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,88	0,36	1,08	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
104,5	1791	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	1,83	0,47	N.D.	0,71	0,45	N.D.	18,34	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
109,5	1818	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	2,34	2,60	2,80	5,97	1,83	9,58	13,85	9,41	N.D.	8,02	N.D.	4,21	N.D.	N.D.	N.D.
114,5	1844	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	5,68	1,95	7,34	7,63	5,73	8,24	8,34	9,61	15,87	17,22	N.D.	13,43	N.D.	6,49	8,65	N.D.	N.D.
119,5	1870	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,83	0,00	0,87	1,41	1,02	1,25	0,72	N.D.	N.D.	2,09	N.D.	3,70	N.D.	N.D.	3,66	N.D.	N.D.
124,5	1897	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	3,15	0,65	3,11	6,81	3,59	4,67	2,98	9,02	10,50	10,30	N.D.	10,71	N.D.	4,72	4,15	N.D.	N.D.
129,5	1923	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	1,81	1,16	1,59	4,10	2,23	4,30	2,08	8,24	11,27	10,53	N.D.	8,65	N.D.	N.D.	5,17	N.D.	N.D.
134,5	1949	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	5,28	2,21	6,55	8,34	5,70	8,72	5,77	17,15	15,50	18,94	4,12	15,68	N.D.	3,24	8,07	0,20	N.D.
139,5	1976	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	3,32	1,07	3,39	7,06	5,15	8,29	5,42	18,71	20,15	18,45	N.D.	15,42	N.D.	6,87	12,04	N.D.	N.D.
144,5	2002	N.D.	N.D.	1,39	N.D.	3,59	0,00	3,07	3,79	3,36	4,63	4,94	9,73	10,39	11,62	3,43	9,85	N.D.	N.D.	6,42	N.D.	N.D.
149,5	2028	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	4,49	1,58	5,38	6,93	4,06	6,34	5,42	12,95	13,94	15,48	N.D.	16,69	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

# X - Annexes

154,5	2055	N.D.	N.D.	2,95	N.D.	5,23	1,54	5,88	9,16	7,59	10,03	14,84	26,32	28,63	27,31	8,73	21,20	N.D.	9,18	10,08	N.D.	N.D.
159,5	2081	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	3,95	0,98	5,83	8,65	8,46	14,35	23,61	36,31	38,49	37,91	16,93	26,42	N.D.	5,99	7,15	N.D.	N.D.
164,5	2107	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	4,31	1,81	6,19	8,63	6,25	7,52	9,02	16,48	17,76	18,56	4,12	16,48	N.D.	N.D.	6,87	N.D.	N.D.
169,5	2134	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	4,96	2,30	4,81	10,43	8,34	13,20	19,26	32,23	36,05	38,30	15,57	24,59	N.D.	9,87	9,10	N.D.	N.D.
174,5	2205	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	3,36	0,62	3,24	5,70	3,10	5,31	3,56	13,21	17,32	14,21	N.D.	12,70	N.D.	N.D.	10,12	N.D.	N.D.
179,5	2271	N.D.	N.D.	1,10	N.D.	4,67	1,16	5,79	9,07	8,33	14,05	21,23	28,15	28,65	27,70	9,90	18,18	N.D.	3,80	N.D.	N.D.	N.D.
184,5	2337	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	4,63	1,00	7,89	9,08	9,38	14,39	25,96	33,39	30,76	29,85	11,69	20,93	N.D.	8,21	8,44	N.D.	N.D.
189,5	2402	N.D.	N.D.	1,71	N.D.	6,87	1,99	9,64	11,46	9,98	14,00	17,76	28,31	25,01	27,17	7,25	19,97	N.D.	11,40	7,14	N.D.	N.D.
194,5	2468	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	3,65	1,08	7,43	13,78	10,78	17,70	27,63	44,15	51,46	51,08	25,34	31,36	9,56	10,83	13,43	N.D.	N.D.
199,5	2533	N.D.	1,29	4,55	3,12	9,25	22,53	86,79	184,13	303,57	414,17	535,27	568,59	512,51	434,57	284,46	208,28	122,26	64,25	33,53	1,51	1,33
204,5	2599	N.D.	0,28	2,26	0,49	4,30	0,11	9,95	17,99	21,93	37,69	45,58	43,36	51,57	49,03	26,03	27,93	15,72	8,96	7,69	0,00	0,30
209,5	2665	N.D.	0,72	3,54	1,30	8,19	6,56	34,48	70,50	109,38	157,73	203,94	201,05	195,11	163,94	95,72	81,02	39,22	17,98	10,58	0,49	0,44
214,5	2730	N.D.	N.D.	0,88	N.D.	3,50	2,50	16,83	39,47	68,40	101,62	139,99	150,66	131,57	108,44	63,83	46,79	25,09	11,23	6,42	N.D.	N.D.
219,5	2796	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	2,80	0,97	12,96	31,91	52,97	82,35	109,52	110,54	101,17	82,23	42,50	34,23	18,21	11,89	5,58	N.D.	N.D.
224,5	2862	N.D.	N.D.	0,32	0,10	1,33	1,00	4,99	11,01	18,24	28,65	38,40	38,71	38,95	31,72	19,12	15,04	9,41	4,14	1,93	0,09	0,08
229,5	2927	N.D.	0,46	2,35	0,00	2,71	N.D.	2,92	4,29	5,37	7,57	11,96	11,60	12,68	11,21	5,51	5,90	3,06	N.D.	N.D.	N.D.	0,50
234,5	2993	N.D.	N.D.	2,31	N.D.	3,20	0,92	5,69	8,82	13,48	19,89	28,79	31,55	29,72	26,37	14,18	13,20	6,08	N.D.	3,64	0,30	N.D.
239,5	3058	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,98	0,70	N.D.	N.D.	N.D.	7,94	1,73	N.D.	1,25	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
		N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
244,5	9110	N.D.	0,00	2,72	0,69	4,85	2,06	9,84	12,21	15,10	20,07	30,55	33,87	31,68	31,17	13,09	14,77	5,13	1,51	4,49	0,57	0,21
249,5	9186	N.D.	0,86	4,09	1,32	8,14	3,85	15,83	15,15	21,36	29,49	35,97	39,55	40,59	42,41	17,09	24,15	7,34	N.D.	N.D.	0,46	0,26
254,5	9263	N.D.	0,00	2,76	1,11	6,13	2,50	10,44	16,38	18,99	25,42	39,96	50,07	49,65	46,30	22,06	24,24	7,68	N.D.	10,84	0,53	0,00
259,5	9340	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	1,55	N.D.	1,64	2,86	2,31	4,48	2,70	7,88	7,59	9,34	N.D.	6,86	N.D.	N.D.	2,96	N.D.	N.D.
264,5	9417	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	3,24	1,13	5,37	5,79	4,88	9,69	7,58	15,22	11,68	14,79	N.D.	8,40	N.D.	N.D.	6,53	N.D.	N.D.
269,5	9494	1,03	2,66	14,61	4,72	27,38	11,66	35,54	37,12	38,77	62,33	55,64	87,93	77,36	95,52	29,79	56,85	N.D.	N.D.	19,93	1,44	0,87
279,5	9647	N.D.	N.D.	0,00	N.D.	0,51	0,40	N.D.	1,35	2,06	N.D.	1,72	6,23	3,01	6,88	N.D.	5,69	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
284,5	9724	N.D.	N.D.	0,77	N.D.	4,02	1,51	6,35	9,25	5,48	9,03	8,42	18,09	17,92	25,60	4,87	16,71	N.D.	4,15	7,40	N.D.	N.D.
289,5	9801	N.D.	N.D.	0,61	N.D.	3,33	1,05	6,11	6,77	5,84	10,50	10,17	20,80	23,93	32,41	11,98	19,94	4,19	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
294,5	9878	N.D.	N.D.	2,76	0,32	5,07	1,13	7,02	8,65	6,67	10,10	13,86	24,16	26,01	30,32	12,82	20,84	3,72	5,60	N.D.	N.D.	N.D.
299,5	9954	N.D.	N.D.	3,79	0,51	8,98	2,34	14,58	15,68	13,13	15,04	15,28	28,08	26,54	34,28	7,75	22,22	N.D.	5,01	N.D.	0,28	N.D.
304,5	10031	N.D.	N.D.	2,73	N.D.	4,62	0,35	3,57	4,15	2,69	5,20	3,38	10,52	8,37	13,05	N.D.	9,00	N.D.	N.D.	N.D.	0,39	0,24
309,5	10108	N.D.	0,59	6,93	N.D.	8,63	0,00	5,89	8,03	5,12	11,30	6,76	22,66	17,29	29,68	N.D.	19,25	N.D.	3,59	10,92	1,76	1,04
314,5	10185	N.D.	0,08	2,89	N.D.	7,48	0,70	5,79	12,19	7,02	18,04	6,26	26,61	20,00	32,99	N.D.	19,87	N.D.	7,11	8,45	1,26	0,23
319,5	10262	N.D.	0,17	2,92	N.D.	7,41	0,59	7,70	8,64	6,12	14,98	7,73	23,35	16,98	29,98	N.D.	21,28	N.D.	7,34	11,54	0,74	0,35



# X - Annexes

324,5	10338	N.D.	N.D.	3,01	N.D.	9,56	N.D.	9,25	8,14	7,97	13,11	10,25	23,16	17,03	27,66	2,92	18,49	N.D.	3,57	7,30	0,60	0,22
329,5	10415	N.D.	0,15	2,59	N.D.	7,14	N.D.	8,49	9,56	7,24	16,42	8,96	23,40	18,48	29,79	N.D.	18,76	N.D.	3,78	7,77	0,87	0,34
334,5	10492	N.D.	N.D.	4,14	N.D.	9,69	N.D.	9,01	7,80	8,21	14,20	10,94	19,24	16,16	21,71	4,59	14,33	N.D.	2,77	12,04	0,18	N.D.
339,5	10569	1,31	0,23	7,23	N.D.	8,19	N.D.	7,00	6,18	9,19	14,45	23,89	36,45	40,09	48,20	26,70	27,24	8,82	8,18	7,09	0,27	0,16
344,5	10646	1,09	0,08	4,67	N.D.	6,49	N.D.	5,68	6,73	7,58	12,28	15,50	20,02	18,61	23,98	7,39	14,93	2,03	3,96	5,73	0,34	0,19
349,5	10722	0,79	N.D.	6,89	N.D.	8,69	N.D.	6,46	5,10	6,42	11,30	11,69	21,60	17,75	27,44	8,32	15,53	1,49	7,70	5,88	0,28	0,26
354,5	10799	3,59	0,18	15,33	N.D.	16,99	N.D.	11,38	9,72	12,35	16,72	17,28	26,91	21,72	30,43	9,12	20,30	2,91	5,18	4,78	N.D.	0,26
359,5	10876	5,77	0,32	15,26	N.D.	16,43	N.D.	10,30	7,66	7,03	11,80	9,31	19,37	15,55	23,87	4,46	14,20	N.D.	2,74	3,10	0,83	0,38
364,5	10953	0,56	N.D.	9,80	N.D.	12,30	N.D.	8,41	5,27	7,89	11,37	13,98	17,14	15,91	20,53	6,38	11,18	N.D.	4,68	3,74	N.D.	N.D.
369,5	11030	1,76	N.D.	10,40	N.D.	10,58	N.D.	7,78	8,77	11,17	17,75	20,54	24,63	21,67	24,81	9,82	14,58	2,25	5,22	4,91	N.D.	N.D.
374,5	11106	1,32	N.D.	4,83	N.D.	5,20	N.D.	4,62	6,18	7,98	19,39	15,78	24,31	19,42	27,86	8,84	14,41	3,40	2,57	4,63	N.D.	N.D.
379,5	11183	1,05	N.D.	10,60	N.D.	11,44	N.D.	7,28	5,10	7,27	19,25	11,62	24,36	18,79	27,43	8,07	16,25	N.D.	4,97	2,73	0,05	N.D.
384,5	11260	N.D.	N.D.	2,23	N.D.	2,92	N.D.	3,53	4,99	9,93	17,01	18,77	22,53	18,39	17,90	10,18	10,45	N.D.	3,35	N.D.	N.D.	2,23
389,5	11337	5,71	N.D.	22,41	N.D.	18,47	N.D.	11,32	7,90	10,59	14,24	16,65	24,60	20,26	25,97	7,25	13,67	N.D.	N.D.	7,26	N.D.	22,41
394,5	11414	1,14	N.D.	2,96	N.D.	3,22	N.D.	2,99	2,91	4,94	7,73	9,98	13,40	10,65	13,72	4,59	7,75	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	2,96
399,5	11490	10,37	0,88	41,29	N.D.	30,41	N.D.	16,90	9,72	10,32	18,43	11,95	26,69	19,39	35,75	5,89	18,22	N.D.	10,43	6,74	0,44	41,29
404,5	11567	N.D.	N.D.	2,24	N.D.	3,34	N.D.	7,43	17,21	28,57	45,19	48,67	58,73	41,67	39,53	20,15	18,20	7,71	7,66	4,15	N.D.	2,24
409,5	11644	6,66	0,97	31,24	N.D.	29,37	N.D.	12,81	4,96	5,67	11,66	4,52	18,32	12,76	26,69	N.D.	12,44	N.D.	3,81	3,62	0,66	31,24
414,5	11721	5,37	0,57	25,82	N.D.	26,46	N.D.	14,53	5,98	6,74	12,02	5,95	17,26	11,99	23,22	N.D.	10,81	N.D.	3,48	3,79	0,62	25,82
419,5	11798	53,13	2,10	77,15	N.D.	44,86	N.D.	18,47	6,87	8,04	7,83	10,50	9,93	12,61	14,70	N.D.	9,99	N.D.	3,94	6,20	1,42	77,15
424,5	11875	6,01	0,49	30,97	N.D.	23,98	N.D.	9,37	3,16	4,02	5,33	2,44	6,19	6,43	8,72	N.D.	4,68	N.D.	3,25	3,83	0,47	30,97
429,5	11951	N.D.	N.D.	19,10	N.D.	26,54	N.D.	13,50	6,29	6,17	8,79	N.D.	10,69	12,04	16,71	N.D.	8,21	N.D.	2,80	5,45	N.D.	19,10
434,5	12028	5,69	0,41	30,61	N.D.	24,43	N.D.	11,78	5,23	6,57	6,88	N.D.	8,21	12,13	11,26	N.D.	8,41	N.D.	4,29	5,27	0,65	30,61
439,5	12105	29,85	1,60	51,50	N.D.	28,82	N.D.	14,32	7,13	9,43	12,46	12,01	19,00	13,78	17,20	5,34	12,22	N.D.	N.D.	3,99	N.D.	51,50
444,5	12182	4,50	0,71	36,16	N.D.	28,44	N.D.	14,56	6,95	8,37	11,80	10,91	15,97	16,81	19,83	N.D.	13,15	N.D.	6,09	6,11	0,29	36,16
449,5	12259	8,30	0,73	37,15	N.D.	29,66	N.D.	16,28	10,47	11,05	16,31	11,62	21,72	22,59	24,23	N.D.	12,55	N.D.	6,08	8,74	0,38	37,15

# X - Annexes

**Tableau X-11 :** Données géochimiques moléculaires, sommes et percentuels des n-alcanes, de la carotte B13, en ng.g<sup>-1</sup>

<i>Prof. (cm)</i>	<i>Âge</i>	<i>S(curtos)</i>	<i>%</i>	<i>S (C16-22)</i>	<i>%</i>	<i>S (C17-23)</i>	<i>%</i>	<i>S(longos)</i>	<i>%</i>	<i>S (C24-32)</i>	<i>%</i>	<i>S (C25-33)</i>	<i>%</i>	<i>S totale</i>
0,5	864	4,34	12,3	0,93	21,5	3,41	78,5	30,90	87,7	13,84	44,8	17,06	55,2	35,24
4,5	913	21,15	12,9	7,26	34,3	13,89	65,7	142,77	87,1	52,27	36,6	90,50	63,4	163,92
9,5	973							10,71	100			10,71	100	10,71
14,5	1034	94,10	8,0	35,23	37,4	58,87	62,6	1078,15	92,0	546,50	50,7	531,65	49,3	1172,25
19,5	1095	34,88	14,8	15,60	44,7	19,28	55,3	200,54	85,2	69,93	34,9	130,61	65,1	235,42
24,5	1156	0,71	1,1	0,00	0,0	0,71	100,0	65,68	98,9	27,44	41,8	38,24	58,2	66,39
29,5	1216	25,88	17,5	12,83	49,6	13,05	50,4	122,00	82,5	50,20	41,1	71,80	58,9	147,89
34,5	1277	18,69	14,6	9,66	51,7	9,02	48,3	109,58	85,4	39,12	35,7	70,46	64,3	128,26
39,5	1338	12,33	2,2	6,44	52,2	5,89	47,8	550,75	97,8	262,69	47,7	288,05	52,3	563,08
44,5	1399	125,00	5,0	38,68	30,9	86,31	69,1	2355,65	95,0	1205,19	51,2	1150,45	48,8	2480,64
49,5	1459	332,22	11,6	142,55	42,9	189,67	57,1	2532,65	88,4	1324,51	52,3	1208,14	47,7	2864,87
54,5	1528	41,71	11,8	16,10	38,6	25,61	61,4	310,47	88,2	143,98	46,4	166,49	53,6	352,19
59,5	1555	27,25	8,6	8,39	30,8	18,86	69,2	288,80	91,4	146,27	50,6	142,53	49,4	316,05
64,5	1581	12,28	8,3	6,63	54,0	5,65	46,0	136,43	91,7	60,75	44,5	75,68	55,5	148,71
69,5	1607	37,28	24,6	21,91	58,8	15,36	41,2	114,36	75,4	39,52	34,6	74,84	65,4	151,64
74,5	1634	25,20	21,7	11,51	45,7	13,68	54,3	90,65	78,3	24,52	27,1	66,13	72,9	115,85
79,5	1660	26,30	19,0	12,63	48,0	13,67	52,0	112,21	81,0	40,79	36,4	71,41	63,6	138,51
84,5	1686	23,50	18,1	10,35	44,0	13,15	56,0	106,64	81,9	34,94	32,8	71,70	67,2	130,14
89,5	1712	1,54	12,3			1,54	100,0	10,95	87,7	3,75	34,3	7,19	65,7	12,48
94,5	1739	0,88	37,9			0,88	100,0	1,44	62,1	0,36	25,0	1,08	75,0	2,31
104,5	1791	2,30	10,5	1,83	79,4	0,47	20,6	19,50	89,5	18,79	96,3	0,71	3,7	21,80
109,5	1818	4,94	8,2	2,34	47,3	2,60	52,7	55,67	91,8	18,48	33,2	37,19	66,8	60,61
114,5	1844	22,61	19,5	13,03	57,6	9,58	42,4	93,59	80,5	38,59	41,2	55,00	58,8	116,20
119,5	1870	3,11	20,0	1,71	54,8	1,41	45,2	12,45	80,0	5,41	43,4	7,04	56,6	15,56
124,5	1897	13,72	18,4	6,26	45,6	7,46	54,4	60,64	81,6	21,22	35,0	39,42	65,0	74,36
129,5	1923	8,66	14,2	3,40	39,3	5,26	60,7	52,47	85,8	20,76	39,6	31,72	60,4	61,13
134,5	1949	22,38	17,9	11,83	52,8	10,56	47,2	102,91	82,1	39,18	38,1	63,73	61,9	125,29
139,5	1976	14,83	11,8	6,71	45,2	8,12	54,8	110,51	88,2	42,76	38,7	67,75	61,3	125,34
144,5	2002	11,84	15,5	8,05	68,0	3,79	32,0	64,36	84,5	28,54	44,3	35,83	55,7	76,21
149,5	2028	18,38	19,7	9,88	53,7	8,51	46,3	74,88	80,3	23,41	31,3	51,47	68,7	93,26
154,5	2055	24,76	13,1	14,06	56,8	10,70	43,2	163,89	86,9	69,86	42,6	94,03	57,4	188,65
159,5	2081	19,41	8,3	9,78	50,4	9,63	49,6	215,63	91,7	94,64	43,9	120,99	56,1	235,03

# X - Annexes

164,5	2107	20,93	16,9	10,50	50,2	10,44	49,8	103,06	83,1	44,02	42,7	59,04	57,3	124,00
169,5	2134	22,50	9,8	9,76	43,4	12,73	56,6	206,53	90,2	88,32	42,8	118,21	57,2	229,02
174,5	2205	12,92	14,0	6,60	51,1	6,32	48,9	79,53	86,0	34,10	42,9	45,43	57,1	92,44
179,5	2271	21,79	12,0	11,56	53,0	10,24	47,0	159,98	88,0	68,11	42,6	91,86	57,4	181,77
184,5	2337	22,61	10,5	12,53	55,4	10,09	44,6	193,00	89,5	86,23	44,7	106,78	55,3	215,61
189,5	2402	31,67	15,9	18,22	57,5	13,45	42,5	168,00	84,1	67,15	40,0	100,85	60,0	199,67
194,5	2468	25,95	8,1	11,09	42,7	14,87	57,3	293,33	91,9	138,21	47,1	155,12	52,9	319,28
199,5	2533	311,66	8,2	100,58	32,3	211,08	67,7	3481,46	91,8	1791,59	51,5	1689,86	48,5	3793,12
204,5	2599	35,39	9,5	16,52	46,7	18,87	53,3	335,49	90,5	168,52	50,2	166,97	49,8	370,87
209,5	2665	125,31	8,9	46,22	36,9	79,09	63,1	1275,69	91,1	653,96	51,3	621,73	48,7	1401,00
214,5	2730	63,18	6,9	21,22	33,6	41,97	66,4	854,03	93,1	435,29	51,0	418,74	49,0	917,21
219,5	2796	48,65	7,0	15,76	32,4	32,89	67,6	651,19	93,0	329,94	50,7	321,25	49,3	699,84
224,5	2862	18,75	7,1	6,64	35,4	12,11	64,6	244,31	92,9	126,04	51,6	118,26	48,4	263,06
229,5	2927	12,74	14,5	7,99	62,7	4,76	37,3	74,87	85,5	38,59	51,5	36,28	48,5	87,61
234,5	2993	20,95	10,1	11,20	53,5	9,74	46,5	186,90	89,9	95,88	51,3	91,01	48,7	207,84
239,5	3058	0,98	7,7			0,98	100,0	11,63	92,3	8,64	74,4	2,98	25,6	12,60
244,5	9110	32,39	13,9	17,42	53,8	14,97	46,2	201,43	86,1	100,05	49,7	101,38	50,3	233,82
249,5	9186	49,25	16,0	28,06	57,0	21,19	43,0	257,96	84,0	122,36	47,4	135,60	52,6	307,21
254,5	9263	39,31	11,8	19,33	49,2	19,98	50,8	295,23	88,2	149,18	50,5	146,04	49,5	334,54
259,5	9340	6,04	12,0	3,19	52,7	2,86	47,3	44,13	88,0	15,56	35,3	28,56	64,7	50,17
264,5	9417	15,53	16,5	8,61	55,5	6,92	44,5	78,77	83,5	30,68	38,9	48,09	61,1	94,30
269,5	9494	134,72	20,4	78,57	58,3	56,16	41,7	524,13	79,6	221,50	42,3	302,63	57,7	658,85
279,5	9647	2,26	8,1	0,51	22,8	1,75	77,2	25,59	91,9	6,79	26,6	18,80	73,4	27,85
284,5	9724	21,90	15,7	11,14	50,9	10,76	49,1	117,67	84,3	44,09	37,5	73,57	62,5	139,57
289,5	9801	17,86	11,3	10,05	56,3	7,81	43,7	139,77	88,7	56,12	40,2	83,65	59,8	157,63
294,5	9878	24,96	13,9	14,85	59,5	10,10	40,5	154,10	86,1	63,08	40,9	91,02	59,1	179,06
299,5	9954	45,88	21,5	27,35	59,6	18,54	40,4	167,33	78,5	62,71	37,5	104,62	62,5	213,21
304,5	10031	15,41	22,8	10,92	70,8	4,50	29,2	52,21	77,2	14,44	27,7	37,77	72,3	67,62
309,5	10108	30,07	19,2	21,45	71,3	8,62	28,7	126,59	80,8	40,10	31,7	86,48	68,3	156,66
314,5	10185	29,13	16,6	16,16	55,5	12,97	44,5	146,36	83,4	41,74	28,5	104,62	71,5	175,49
319,5	10262	27,44	16,5	18,04	65,7	9,41	34,3	139,30	83,5	42,37	30,4	96,93	69,6	166,74
324,5	10338	29,96	18,6	21,82	72,8	8,14	27,2	131,47	81,4	45,48	34,6	85,99	65,4	161,44
329,5	10415	27,93	17,2	18,22	65,2	9,71	34,8	134,60	82,8	42,44	31,5	92,15	68,5	162,52
334,5	10492	30,65	19,8	22,85	74,6	7,80	25,4	124,19	80,2	51,95	41,8	72,25	58,2	154,84

# X - Annexes

339,5	10569	30,13	10,7	23,72	78,7	6,41	21,3	250,31	89,3	115,79	46,3	134,52	53,7	280,44
344,5	10646	24,75	15,8	17,94	72,5	6,82	27,5	132,01	84,2	56,84	43,1	75,17	56,9	156,76
349,5	10722	27,94	17,1	22,83	81,7	5,10	18,3	135,12	82,9	51,55	38,2	83,57	61,8	163,06
354,5	10799	57,18	25,4	47,28	82,7	9,90	17,3	167,69	74,6	68,15	40,6	99,55	59,4	224,87
359,5	10876	55,74	33,3	47,76	85,7	7,98	14,3	111,42	66,7	39,44	35,4	71,98	64,6	167,16
364,5	10953	36,33	24,4	31,07	85,5	5,27	14,5	112,79	75,6	47,89	42,5	64,90	57,5	149,13
369,5	11030	39,28	20,0	30,51	77,7	8,77	22,3	157,36	80,0	70,36	44,7	87,00	55,3	196,64
374,5	11106	22,16	13,0	15,97	72,1	6,18	27,9	148,58	87,0	60,04	40,4	88,53	59,6	170,74
379,5	11183	35,47	20,1	30,37	85,6	5,10	14,4	140,72	79,9	48,47	34,4	92,25	65,6	176,19
384,5	11260	13,68	9,6	8,69	63,5	4,99	36,5	128,51	90,4	62,86	46,9	71,24	53,1	142,19
389,5	11337	65,80	31,9	57,91	88,0	7,90	12,0	140,48	68,1	62,00	44,1	78,48	55,9	206,29
394,5	11414	13,22	15,4	10,31	78,0	2,91	22,0	72,77	84,6	30,16	41,4	42,61	58,6	85,99
399,5	11490	109,58	40,1	98,97	90,3	10,61	9,7	163,81	59,9	54,29	33,1	109,52	66,9	273,39
404,5	11567	30,21	8,6	13,01	43,0	17,21	57,0	320,24	91,4	150,93	47,1	169,31	52,9	350,45
409,5	11644	86,02	46,4	80,09	93,1	5,94	6,9	99,49	53,6	26,57	26,7	72,92	73,3	185,52
414,5	11721	78,72	45,2	72,17	91,7	6,55	8,3	95,26	54,8	28,47	29,9	66,80	70,1	173,99
419,5	11798	202,58	70,8	193,61	95,6	8,97	4,4	83,75	29,2	37,35	44,6	46,40	55,4	286,33
424,5	11875	73,99	62,2	70,34	95,1	3,65	4,9	44,87	37,8	16,71	37,2	28,17	62,8	118,86
429,5	11951	65,43	48,0	59,14	90,4	6,29	9,6	70,85	52,0	23,66	33,4	47,19	66,6	136,28
434,5	12028	78,16	55,4	72,52	92,8	5,64	7,2	63,01	44,6	23,96	38,0	39,05	62,0	141,17
439,5	12105	133,22	55,8	124,49	93,4	8,73	6,6	105,43	44,2	44,54	42,2	60,89	57,8	238,65
444,5	12182	91,32	45,6	83,66	91,6	7,66	8,4	109,04	54,4	42,21	38,7	66,83	61,3	200,37
449,5	12259	102,60	43,2	91,40	89,1	11,20	10,9	134,88	56,8	54,00	40,0	80,88	60,0	237,48

**Tableau X-12 :** Données géochimiques moléculaires, alcenones, de la carotte B13

<i>Profondeur (cm)</i>	<i>Âge (ans cal BP)</i>	<i><math>U'_{k37}</math></i>	<i>Température (°C)</i>
0,5	864	N.D.	-
1,5	876	0,87	24,2
3,5	900	0,79	21,9
4,5	913	0,85	23,8
5,5	925	0,76	21,0
7,5	949	0,75	20,6
9,5	973	0,73	20,2
11,5	998	0,78	21,5
13,5	1022	0,76	20,9
14,5	1034	0,76	20,8
15,5	1046	0,76	21,0
17,5	1071	N.D.	-
19,5	1095	0,74	20,2
21,5	1119	0,79	21,7
23,5	1144	N.D.	-
24,5	1156	0,54	14,3
25,5	1168	N.D.	-
27,5	1192	N.D.	-
29,5	1216	0,75	20,6
31,5	1241	0,73	20,1
33,5	1265	0,76	21,0
34,5	1277	0,78	21,4
35,5	1289	0,77	21,3
37,5	1314	0,80	22,1
39,5	1338	0,84	23,2
41,5	1362	0,79	21,8
43,5	1387	0,73	20,2
44,5	1399	0,82	22,6
45,5	1411	0,80	22,1
47,5	1435	0,77	21,2
49,5	1459	0,73	20,0
51,5	1490	0,74	20,4
53,5	1523	0,77	21,2
54,5	1528	0,74	20,4
55,5	1534	0,74	20,3
57,5	1544	0,74	20,4
59,5	1555	0,76	20,9
61,5	1565	0,68	18,5
63,5	1576	0,80	22,2
64,5	1581	0,78	21,6
65,5	1586	0,74	20,3
67,5	1597	0,77	21,3
69,5	1607	0,80	22,0
71,5	1618	0,80	22,3
73,5	1628	0,82	22,8
74,5	1634	0,75	20,7
75,5	1639	0,81	22,4
77,5	1649	0,79	21,8

## X - Annexes

79,5	1660	0,76	20,9
81,5	1670	0,84	23,5
83,5	1681	0,79	21,9
84,5	1686	0,81	22,5
85,5	1691	0,84	23,4
87,5	1702	0,80	22,0
89,5	1712	0,79	21,7
91,5	1723	0,76	20,9
93,5	1734	0,79	22,0
94,5	1739	0,80	22,2
95,5	1744	N.D.	-
97,5	1755	0,82	22,7
99,5	1765	N.D.	-
101,5	1776	N.D.	-
103,5	1786	N.D.	-
104,5	1791	0,71	19,5
105,5	1797	N.D.	-
107,5	1807	N.D.	-
109,5	1818	0,61	16,3
111,5	1828	N.D.	-
113,5	1839	0,75	20,5
114,5	1844	0,78	21,7
115,5	1849	0,79	21,8
119,5	1870	0,76	20,9
124,5	1897	0,74	20,3
129,5	1923	0,76	20,8
134,5	1949	0,85	23,6
139,5	1976	N.D.	-
144,5	2002	N.D.	-
149,5	2028	N.D.	-
154,5	2055	0,77	21,2
159,5	2081	0,75	20,6
164,5	2107	0,78	21,6
169,5	2134	0,79	21,7
174,5	2205	0,78	21,5
179,5	2271	0,90	25,2
184,5	2337	0,85	23,7
199,5	2533	N.D.	-
204,5	2599	0,76	21,1
209,5	2665	N.D.	-
214,5	2730	N.D.	-
219,5	2796	N.D.	-
224,5	2862	N.D.	-
229,5	2927	N.D.	-
234,5	2993	N.D.	-
244,5	9110	N.D.	-
249,5	9186	N.D.	-
254,5	9263	N.D.	-
264,5	9417	N.D.	-
284,5	9724	N.D.	-
294,5	9878	N.D.	-
304,5	10031	N.D.	-

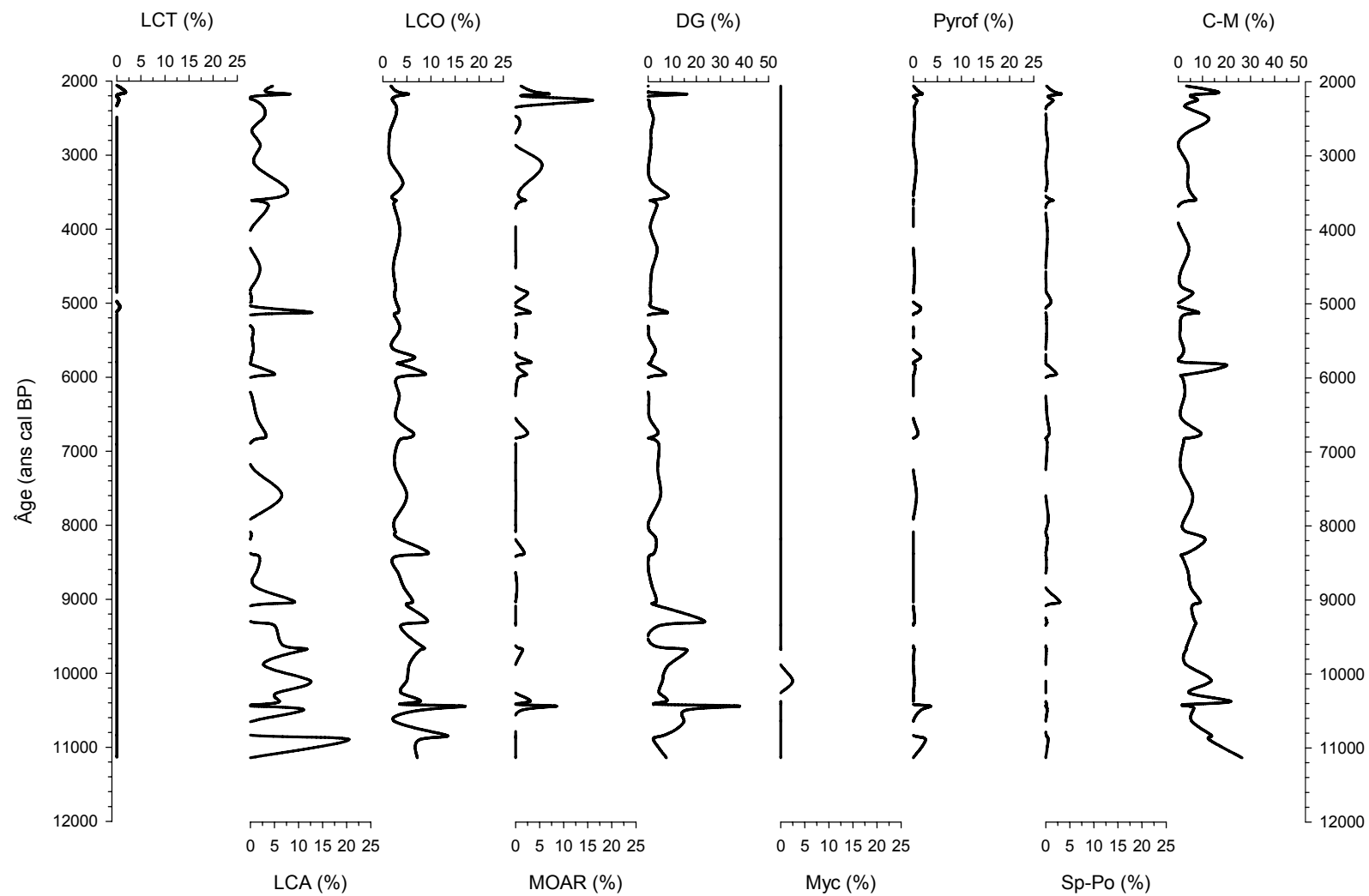
## X - Annexes

309,5	10108	N.D.	-
314,5	10185	0,82	22,8
319,5	10262	0,78	21,4
324,5	10338	0,78	21,7
329,5	10415	0,81	22,6
334,5	10492	0,79	21,9
339,5	10569	0,78	21,5
344,5	10646	0,79	21,9
349,5	10722	0,80	22,1
354,5	10799	0,80	22,1
359,5	10876	0,78	21,5
364,5	10953	0,83	23,0
369,5	11030	0,82	22,6
374,5	11106	0,79	21,8
379,5	11183	N.D.	-
384,5	11260	0,77	21,1
389,5	11337	0,82	22,8
394,5	11414	0,84	23,2
399,5	11490	0,76	21,1
419,5	11798	0,79	21,8
424,5	11875	0,82	22,7
434,5	12028	0,88	24,4
439,5	12105	0,83	23,2
444,5	12182	0,85	23,7
449,5	12259	0,84	23,4

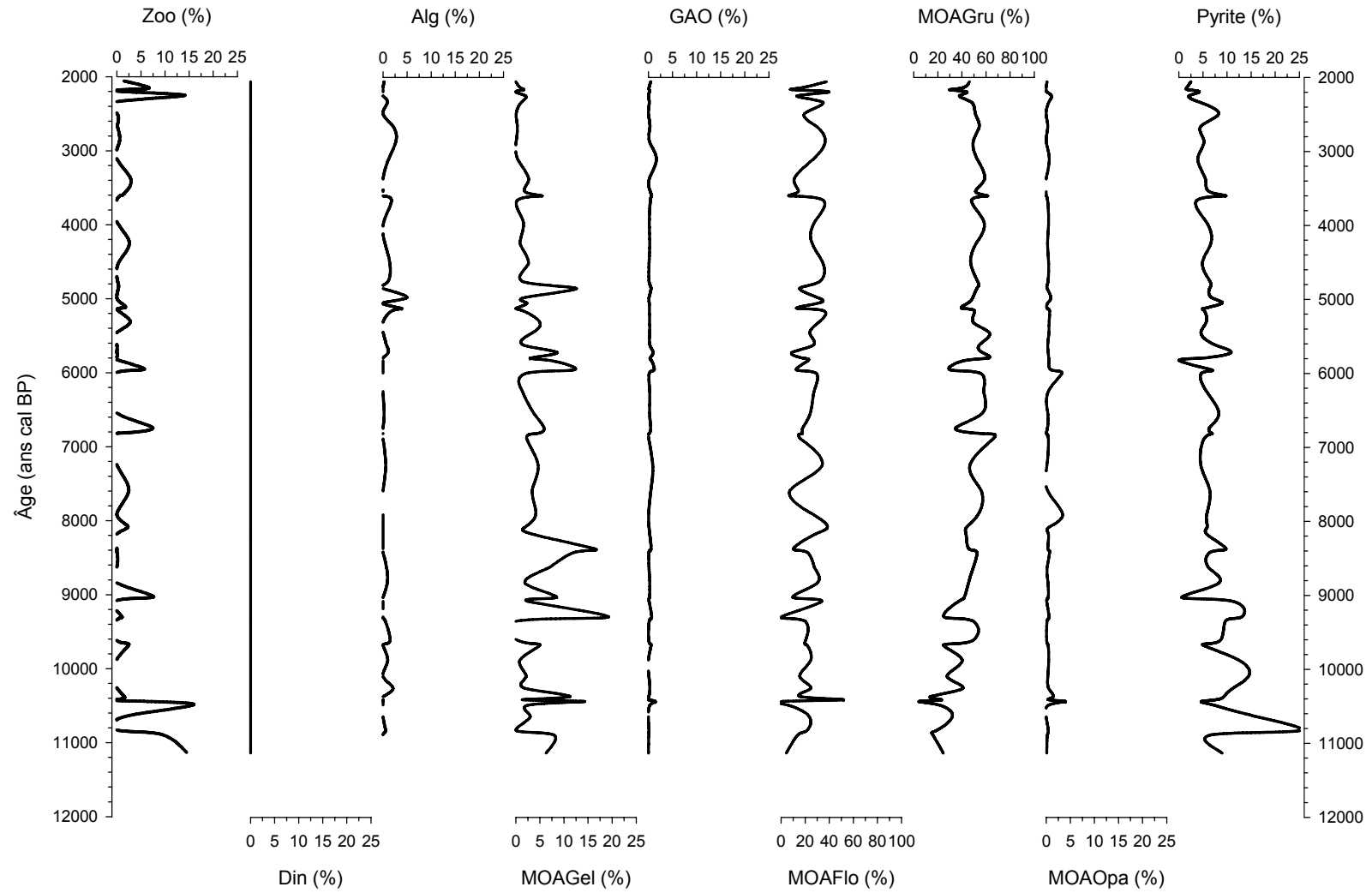
***X.3. – Profils de distributions de la totalité des classes de  
palynofaciès observés***

**X.3.1. – Site Atlantique sud-ouest**





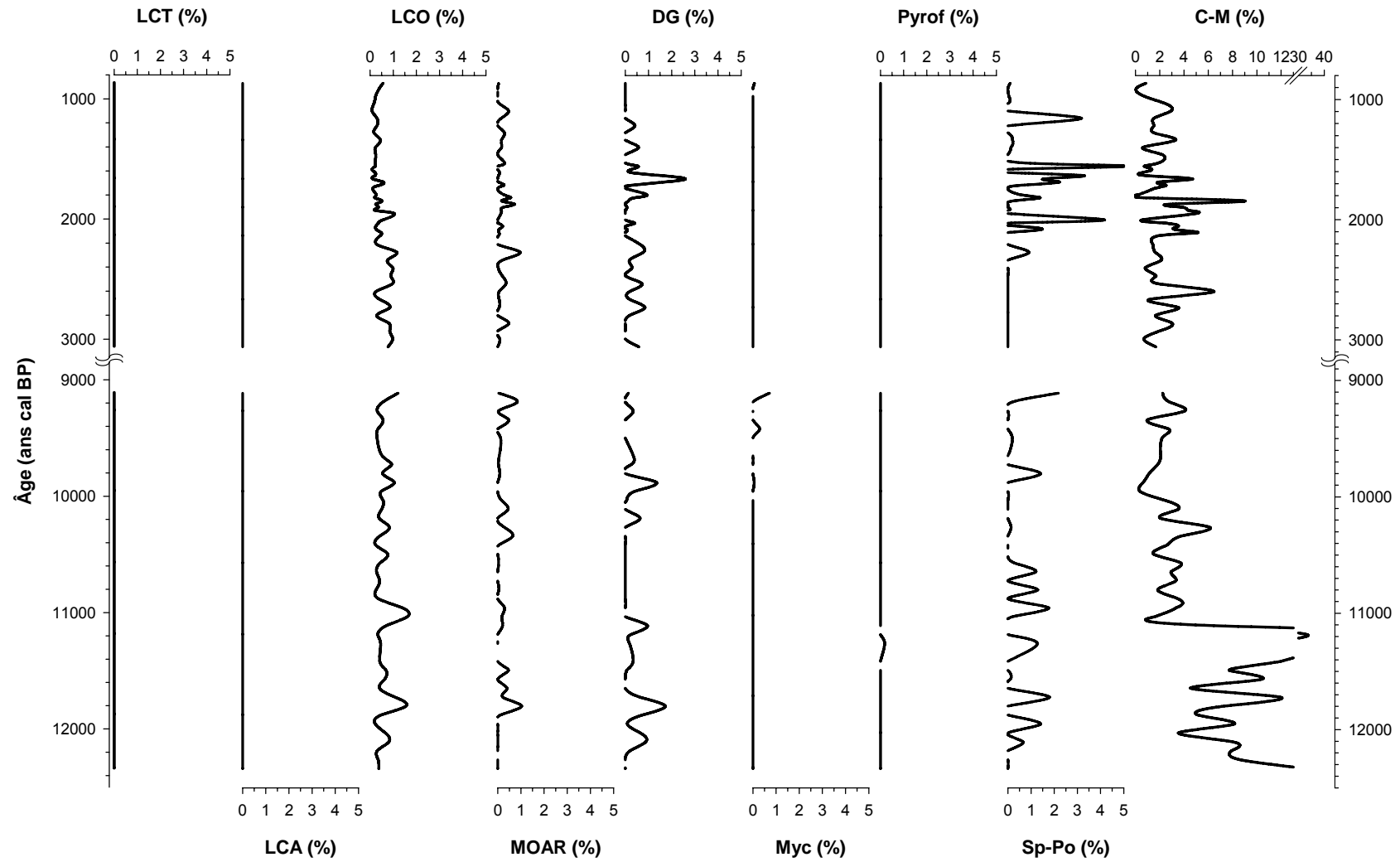
**Figure X-3A :** Profils en fonction du temps des classes des palynofaciès de carotte CF02-02A.



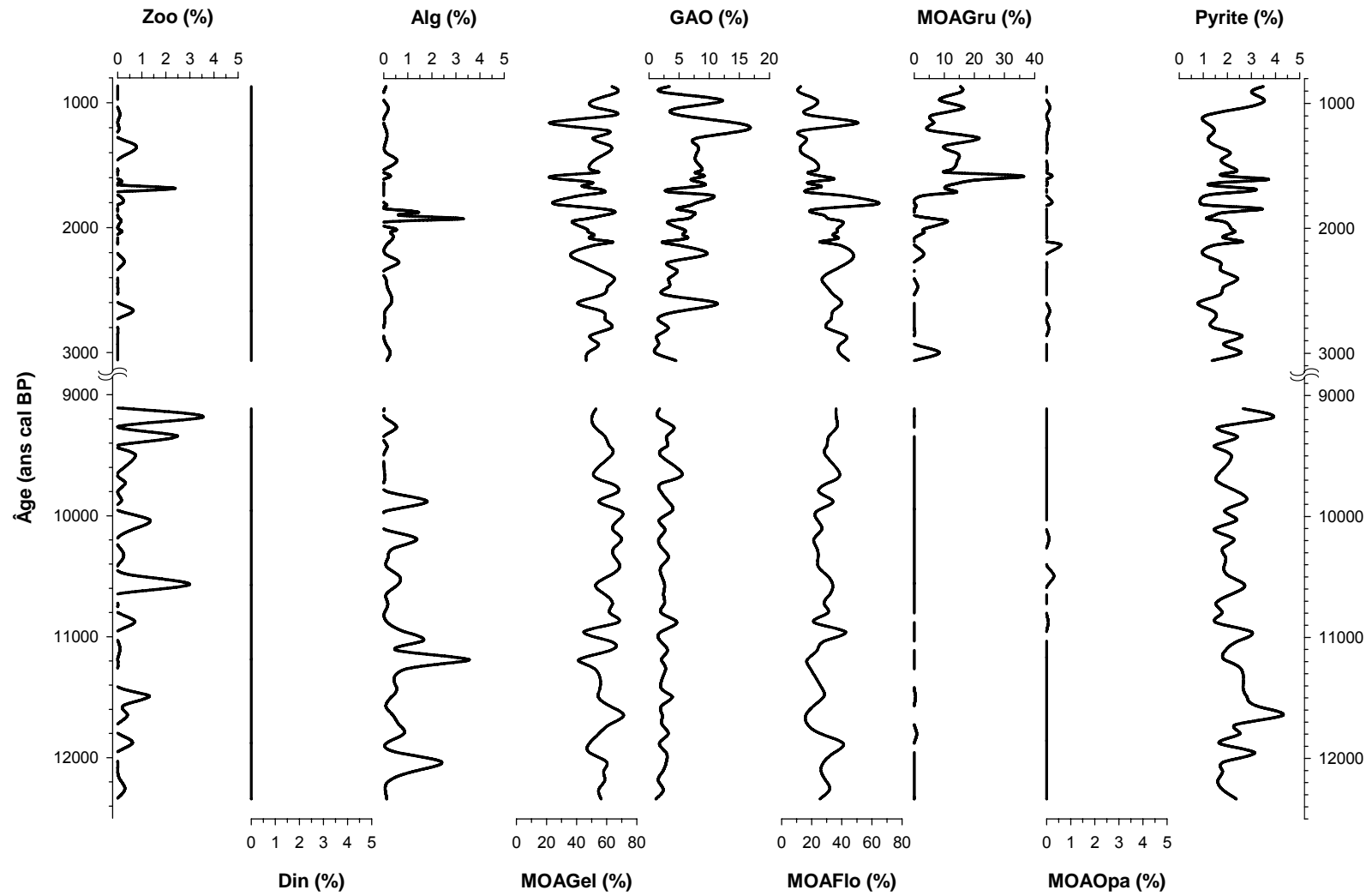
**Figure X-3B :** Profils en fonction du temps des classes des palynofaciès de carotte CF02-02A.



**X.3.2. – Site Pacifique sud-est**



**Figure X-4A :** Profil en fonction du temps des classes des palynofaciès de carotte B13.



**Figure X-4B :** Profil en fonction du temps des classes des palynofaciès de carotte B13.







**Marcio Henrique DA COSTA GURGEL**

**LA SÉDIMENTATION ORGANIQUE ASSOCIÉE À DEUX SYSTÈMES D'UPWELLING EN AMÉRIQUE DU SUD TROPICALE : IMPLICATIONS PALÉOCÉANOGRAPHIQUES ET PALÉOCLIMATIQUES AU COURS DE L'HOLOCÈNE**

**Résumé**

Le climat de l'Amérique du Sud est fortement soumis aux interactions entre l'océan et l'atmosphère, aussi bien du Pacifique que de l'Atlantique. Ce travail entre dans le projet de coopération CLIMPAST (IRD-CNPq) et s'appuie sur une collaboration entre le Brésil (CAPES, UFF), le Pérou (IMARPE) et la France (IRD, CNRS, Université d'Orléans). Cette thèse a pour objectif la reconstruction de l'évolution du climat de l'Amérique du Sud au cours de l'Holocène (12 000 - 800 ans cal BP). Elle concerne l'étude, à haute résolution temporelle, de multiples marqueurs organo-sédimentaires provenant de zones de haute productivité de la plateforme continentale de part et d'autre de l'Amérique du Sud. Deux carottes sédimentaires ont été étudiées, une prélevée dans le système d'upwelling saisonnier de Cabo Frio (Brésil) et l'autre dans le système permanent du courant de Humboldt (Pérou). La matière organique a été étudiée par analyse élémentaire, pyrolyse Rock-Eval, microscopie optique et géochimie moléculaire. Appuyées sur une stratigraphie de très haute résolution (imagerie radioscopique et modèles chronologiques  $^{14}\text{C}$ ), l'ensemble des résultats a permis de mettre en évidence des changements climatiques, de l'échelle du millénaire à celle de la décennie, liés aux déplacements de la zone de convergence intertropicale et de celle de l'Atlantique Sud. La remontée du niveau de la mer de la dernière déglaciation apparaît concomitante d'une forte humidité sur le continent Sud-Américain. A partir de l'Holocène moyen, l'expression de l'upwelling sur la côte ouest, est maximale alors que sur la côte est, on note des phénomènes érosifs dus aux courants de fond. A l'Holocène supérieur, des signaux de haute fréquence de type El Niño passent successivement au moment de l'Optimum Climatique Médiéval, à des signaux de moindre fréquence du type La Niña.

**ORGANIC SEDIMENTATION FROM TWO TROPICAL SOUTH AMERICAN UPWELLING SYSTEMS: PALEOCEANOGRAPHIC AND PALEOCLIMATIC ASPECTS DURING THE HOLOCENE**

**Résumé en anglais**

South American climate is strongly affected by ocean-atmosphere interactions, especially those coming from Pacific and Atlantic oceans. This work is under the scope of a broad scientific cooperation project CLIMPAST (IRD - CNPq), and is financially supported by Brazil (CAPES, UFF), Peru (IMARPE) and France (IRD, CNRS, Université d'Orléans). The objectives of this thesis are to reconstruct the climatic evolution of South America during the Holocene (12 000 - 800 ans cal BP). It is based on a high temporal resolution study of several organic sedimentary proxies from high productivity zones of eastern and western continental shelves of South America. Two sedimentary cores were studied, the first was sampled in the Cabo Frio (Brazil) seasonal upwelling system and the last was sampled from Humboldt Current in front of Peru, the latter was from a permanent upwelling system. The organic matter was analysed by bulk elementary, Rock-Eval pyrolysis, palynofacies and molecular geochemical methods, as well as a very high resolution stratigraphy (X ray imaging and  $^{14}\text{C}$  based chronological models). Based on our results we have reconstructed the climatic changes in different time scales (millennium to decadal time intervals), mainly linked to the displacements of Intertropical and South Atlantic Convergence Zones. Last sea level rising is accompanied by moister conditions on the continent. Middle Holocene represents the strongest upwelling records in the Atlantic side. Eroded traces are found in the Pacific side during the same period. While the Upper Holocene shows higher frequency (El Niño type) and then changed to more low frequency during the Medieval Climate Optimum, guided by a La Niña type record.